

Élevages au pâturage et développement durable des territoires méditerranéens et tropicaux

Connaissances récentes sur leurs atouts et faiblesses

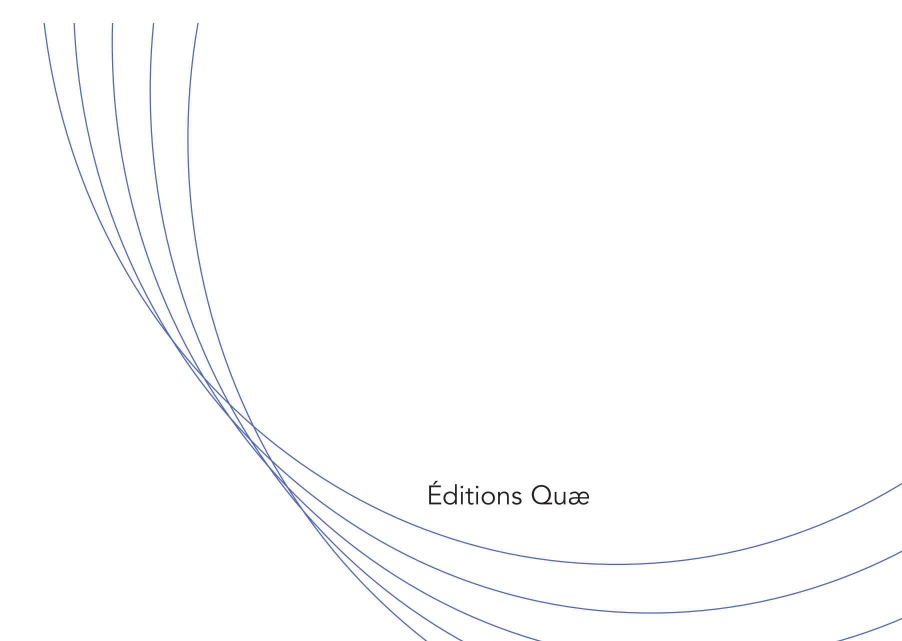
Alexandre Ickowicz et Charles-Henri Moulin, coord.



Élevages au pâturage et développement durable des territoires méditerranéens et tropicaux

Connaissances récentes sur leurs atouts et faiblesses

A. Ickowicz et C.-H. Moulin, éditeurs scientifiques



Éditions Quæ

Collection Matière à débattre et décider

Gouverner les coopératives agricoles
X. Hollandts
2021, 136 p.

La montée du niveau de la mer d'ici 2100. Scénarios et conséquences
D. Lacroix, O. Mora, N. de Menthière, A. Béthinger
2021, 128 p.

Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel et à quel coût ?
S. Pellerin, L. Bamière, I. Savini, O. Rechauchère, coord.
2021, 232 p.

Qualité des aliments d'origine animale. Production et transformation
S. Prache, V. Santé-Lhoutellier, C. Donnars, coord.
2021, 170 p.

Cet ouvrage a bénéficié du financement d'INRAE et du Cirad via l'UMR Selmet.

Photos de couverture : élevage transhumant dans les Alpes, M. Meuret/INRAE ;
élevage sur prairie en Amazonie, V. Blanfort/Cirad ;
jour de marché sur parcours au Sahel, A. Ickowicz/Cirad.

ISBN papier : 978-2-7592-3485-1
ISBN PDF : 978-2-7592-3486-8
ISBN ePub : 978-2-7592-3487-5
ISSN : 2115-1229

Éditions Quæ
RD 10
78026 Versailles Cedex

www.quae.com
www.quae-open.com

Table des matières



Remerciements

CET OUVRAGE EST PAR CHOIX COLLECTIF ET PLURIDISCIPLINAIRE. Il est le fruit de synthèses des travaux des agents de l'UMR Selmet. Nous remercions ici tous les collègues qui se sont investis dans ces travaux durant la dernière décennie et ceux qui ont contribué à la rédaction et la coordination des différents chapitres.

Cet ouvrage mobilise de fait un ensemble de travaux réalisés par des équipes de recherche et de partenaires associés à l'UMR Selmet situés sur plusieurs continents de par le monde. Nous remercions ici chaleureusement l'ensemble de nos partenaires de recherche (mentionnés dans les publications citées), mais aussi du développement, ainsi que les partenaires financiers qui ont permis par leurs contributions la réalisation de ces travaux. La liste exhaustive serait pratiquement impossible à établir sur cette simple page car elle devrait intégrer l'ensemble des institutions de recherche impliquées (universités, instituts et centres de recherche), les ministères concernés, les partenaires publics et privés de financement, les organisations internationales partenaires, les organisations non gouvernementales, les partenaires territoriaux, etc. La plupart de ces partenaires apparaîtront dans les lignes de cet ouvrage ou des références bibliographiques citées mais nous présentons d'avance nos excuses si tel n'était pas le cas.

Nous remercions plus particulièrement l'ensemble des éleveurs et les membres de leur famille qui ont été, à titre individuel ou comme membres d'associations, des partenaires actifs de nos recherches sur les terrains. Cet ouvrage vise avant tout à leur être utile.

Nous remercions aussi nos institutions de tutelles, le Cirad, INRAE et l'Institut agro Montpellier, qui nous ont toujours soutenus scientifiquement et donné les moyens de réaliser ces travaux. Ces derniers ont permis de mettre en œuvre le projet scientifique de l'UMR Selmet 2015-2020 qui sous-tend la rédaction de cet ouvrage.

Enfin, nous remercions nos trois relecteurs scientifiques pour le temps consacré, leur professionnalisme et leur pertinence qui nous ont grandement aidés à la finalisation de cet ouvrage, raison pour laquelle nous leur avons demandé d'en rédiger la préface en toute connaissance du contenu.

Alexandre Ickowicz et Charles-Henri Moulin



Préface

Et si le pastoralisme nous montrait la voie pour opérer la transition agroécologique de l'élevage, au moins pour ce qui concerne les ruminants valorisant des ressources herbagères ?

Telle est la question que nous pouvons légitimement nous poser à la lecture de cet ouvrage, dédié aux systèmes d'élevage de ruminants agropastoraux en zones méditerranéennes et tropicales. Ces systèmes ne remplissent-ils pas l'ensemble des services attendus par l'élevage ? Ne sont-ils pas conformes aux principes de l'agroécologie, selon lesquels la diversité est un atout, selon lesquels les processus écologiques doivent être mis en avant et promus en substitution des intrants de synthèse, selon lesquels les processus adaptatifs sont la clé pour en accroître la durabilité ? Ne constituent-ils pas les piliers d'un développement territorial durable au sud ?

Le présent ouvrage démontre que l'élevage au pâturage fait preuve d'adaptation, d'innovation, de performance et d'efficience. De façon convaincante, cet ouvrage disqualifie les images d'un secteur statique, enferré dans des traditions multimillénaires, et contraint par des environnements hostiles, et déjoue les scénarios les plus pessimistes, dans un monde changeant et incertain.

Les études compilées dans cet ouvrage relatent les travaux les plus récents conduits par les collectifs de l'unité mixte de recherche Selmet sur les statuts, fonctions et externalités des systèmes d'élevage au Sud, analysés à l'aune des objectifs de développement durable établis par les États membres des Nations unies et tenant compte des contingences contextuelles diverses, complexes et dynamiques des zones méditerranéennes et tropicales.

Certes, il apparaît à la lecture des différents chapitres qu'il n'existe pas une forme unique de systèmes d'élevage herbagers méditerranéens et tropicaux et que, comme pour toutes les formes d'agriculture dans le monde, plusieurs modèles coexistent et interagissent au sein de territoires parfois restreints. Cette coexistence de modèles, nécessaire au développement durable des territoires concernés n'est pas l'objet de l'ouvrage ; en revanche, nous retenons que les cas présentés sont autant d'exemples et de pistes que les acteurs de la recherche et du développement ont intérêt à étudier dans leur démarche de conception des systèmes d'élevage du futur, tels qu'ils sont attendus à l'issue de la transition agroécologique.

Ces pistes relèvent à la fois des processus biologiques et des propriétés intrinsèques des entités constitutives des systèmes (végétales et animales), mais aussi des processus organisationnels, incluant la conduite des systèmes (les pratiques d'élevage), et enfin de l'environnement sociotechnique dans lesquels les éleveurs évoluent (cercle familial, acteurs de l'amont et de l'aval des filières, acteurs des politiques publiques).

Deux aspects retiennent particulièrement notre attention, dans la mesure où les voies de recherche qui les concernent ne sont pas forcément évidentes à première vue et pour lesquelles les différents chapitres apportent des éclairages substantiels. Il s'agit d'une part du rôle et du statut des pratiques et des ressources locales, réputées adaptées aux contraintes de milieux et aux attentes des sociétés dans lesquelles elles ont évolué et, d'autre part, du rôle et du statut des processus d'innovations, en particulier technologiques.

Pour le premier aspect, la question est posée, pour les différents exemples tirés de terrains africains, asiatiques et sud-américains, des éléments et formes de production (animales et végétales) les plus à même de conférer aux systèmes la multiperformance qui en est attendue (production alimentaire, revenus, épargne sur pied, travail, protection des sols, préservation de l'environnement…). Le développement récent de l'élevage dans ces régions a largement reposé sur un transfert de matériel génétique, des pratiques et des technologies en provenance des pays du Nord ainsi que des chaînes de valorisation associées. La transition agroécologique nécessaire peut-elle utilement associer les deux, comme cela se pratique par exemple chez les éleveurs qui conduisent leur troupeau en croisement ou encore chez ceux (souvent les mêmes) qui misent sur les couverts plurispécifiques pour assurer la production fourragère nécessaire à l'alimentation du troupeau ? Comment peut-elle par ailleurs faire meilleur usage d'une ressource végétale dont l'état et les modes de gestion témoignent d'une pression croissante ? Comment permet-elle enfin de répondre à une demande en pleine évolution quant aux volumes et modalités de production ? Dans tous ces cas, les procédures d'adaptation telles que nous les avons connues doivent sans doute fortement évoluer, en intégrant par exemple des aptitudes à cohabiter, à fournir au système des propriétés complémentaires les unes des autres. Il nous semble alors que les démarches d'évaluation multicritère vont jouer un rôle croissant à tous les niveaux d'organisation (de l'individu, composante du système, jusqu'aux territoires sur lesquels cohabitent différents systèmes).

Pour le second aspect, la question consiste à se demander comment transition agroécologique et innovations technologiques peuvent se confronter et se renforcer. Cela concerne en partie le premier point, avec les technologies liées à la gestion des ressources et à la sélection génétique, mais porte aussi sur les technologies du numérique au service de la transition agroécologique. L'enjeu semble assez clair : il s'agit de mettre en place les moyens d'acquérir les données sur l'état du système (de la ressource au consommateur) pour pouvoir le piloter (ajuster les pratiques), en particulier pour les processus écologiques évoqués plus haut. C'est en grande partie en raison de la complexité d'accès à cet état des systèmes que ceux-ci se sont simplifiés, se sont spécialisés et sont devenus de plus en plus dépendants d'intrants et de chaînes de valeur, ces derniers étant faciles à quantifier et à qualifier. Comme les auteurs le montrent dans cet ouvrage, les technologies du numérique, à la condition qu'elles soient accessibles et se substituent à d'autres postes de dépenses (et permettent donc des gains d'efficience), seront des leviers précieux pour la transition agroécologique des systèmes herbagers, et encore davantage



pour les systèmes agropastoraux, pour lesquels la connaissance des états du système (animaux et surtout végétaux), est particulièrement difficile à acquérir.

La richesse des situations explorées et la clarté du cadre d'analyse apportent des éléments précieux sur ce que peut être l'avenir de l'élevage herbager et agropastoral en zones méditerranéennes et tropicales, non seulement dans ces zones, mais également dans toutes les régions du monde, pour l'ensemble de ces systèmes. Elles permettent de poser sereinement le débat sur les contributions et l'acceptabilité sociétale d'une activité agricole qui fait l'objet de nombreuses critiques. La somme des travaux présentés ici va sans nul doute constituer une référence pour les acteurs de la recherche, mais aussi du développement, de l'enseignement et de la formation, contribuant ensemble à définir ce que seront les systèmes d'élevage de demain.

Pierre Gerber, Banque mondiale, Expert élevage principal
Stéphane Ingrand, INRAE, Directeur adjoint du département Phase
Sylvain Perret, Cirad, Directeur du département Environnement et Sociétés

Préambule

Cet ouvrage a été initié sur la base des travaux réalisés par notre unité mixte de recherche « Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux » (UMR Selmet). Créée en 2011 à Montpellier, elle était composée alors d'une soixantaine d'agents permanents des institutions de recherche Cirad et INRAE et d'enseignants-chercheurs de l'Institut agro Montpellier.

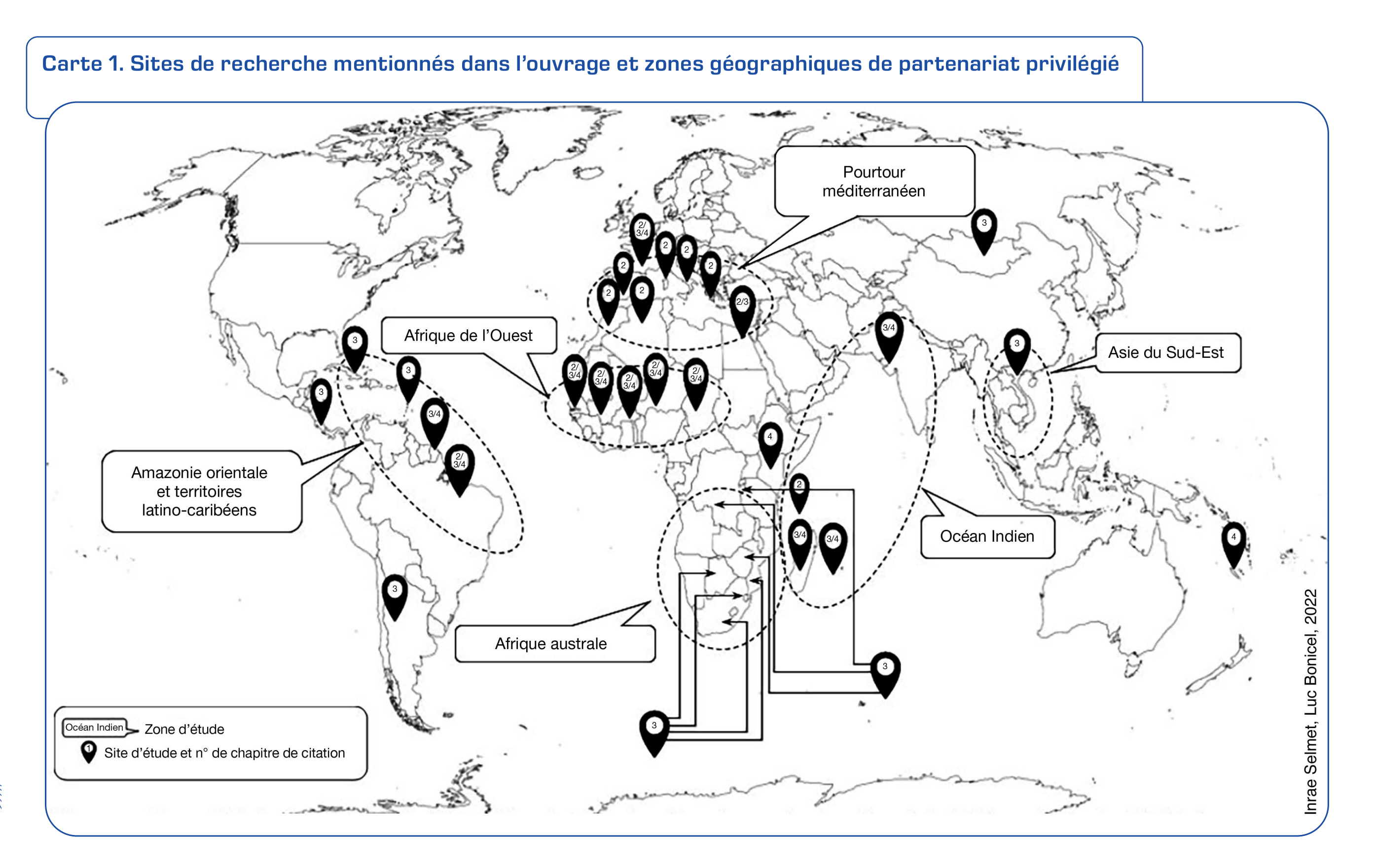
L'historique de l'organisation de la recherche française en élevage a fait de l'UMR Selmet une unité assez spécifique dans le paysage français. Du fait des mandats que les tutelles de l'unité nous ont donnés (mandat du Cirad pour les systèmes pastoraux et agropastoraux dans les pays en développement du Sud, mandat d'INRAE et de l'Institut agro pour les systèmes d'élevage agropastoraux de la zone méditerranéenne), nous avons centré le projet scientifique 2015-2020 de l'unité sur ***l'élevage familial de ruminants au pâturage en zones méditerranéennes et tropicales***. Une caractéristique majeure de ces élevages est l'utilisation pour le pâturage de végétations spontanées (parcours, prairies) ou de résidus de cultures, au sein de systèmes plutôt extensifs et n'utilisant pas par définition de main-d'œuvre permanente hors de la famille. Le projet de l'unité consistait à analyser les rôles de ces élevages familiaux de ruminants dans la réponse aux défis de la sécurité alimentaire, de la préservation de l'environnement et de la prise en compte des demandes sociétales (économie, environnement, cohésion sociale), en parallèle ou en interaction avec d'autres modèles de développement de l'élevage. Ce projet central était décliné en trois objectifs : (i) le renforcement des capacités d'adaptation de ces élevages, (ii) l'amélioration de leur efficience aux plans social, économique et environnemental et (iii) la favorisation des processus d'innovation pour que ces élevages prennent leur place dans la transition agroécologique.

À l'échelle internationale, ces systèmes d'élevage familiaux de ruminants au pâturage ont généralement été moins étudiés que d'autres systèmes, les efforts de recherche ayant plutôt appuyé les dynamiques d'intensification et d'industrialisation de l'élevage. Cependant, ces élevages, du fait de leur capacité à mobiliser une diversité de ressources issues d'écosystèmes peu anthropisés et à recycler les biomasses des agroécosystèmes, présentent des atouts dans le cadre des questions posées par la transition agroécologique de l'agriculture et de l'élevage en particulier. Nous souhaitons donc, à travers cet ouvrage, réaliser une synthèse en direction des différents acteurs du secteur de l'élevage à partir des nombreux travaux pluri- et interdisciplinaires réalisés par notre collectif durant les dix dernières années et publiés dans des revues scientifiques (voir la carte 1 représentant les sites étudiés). Cet ouvrage ne prétend pas à l'exhaustivité en matière de thématiques et de résultats sur ces systèmes d'élevage, mais vise à proposer, sur la base des connaissances actuelles et de nos travaux, des messages clairs sur leur potentielle contribution au développement durable dans les territoires concernés. En effet,

nous considérons que ces systèmes d'élevage souffrent d'un défaut d'intérêt et d'investissement à la fois des scientifiques et des institutions de développement et nous souhaitons démontrer les atouts spécifiques, voire uniques, qu'ils possèdent pour contribuer au développement de systèmes alimentaires durables.

Nous devons également signaler que si cet ouvrage collectif a été rédigé exclusivement par des chercheurs de notre UMR Selmet à quelques exceptions près, la très grande majorité des travaux ont été réalisés sur site en collaboration avec des chercheurs des pays partenaires du Nord et des Suds qui sont présents dans les citations et les références présentées dans la bibliographie.

Carte 1. Sites de recherche mentionnés dans l'ouvrage et zones géographiques de partenariat privilégié



1. Les élevages familiaux de ruminants au pâturage en zones méditerranéennes et tropicales face aux enjeux du développement durable

Alexandre Ickowicz, Charles-Henri Moulin

Depuis plusieurs décennies, la contribution de l'élevage au développement durable, dans ses composantes économique, sociale et environnementale, est particulièrement questionnée au sujet de ses impacts négatifs sur :

- l'environnement (pollution, changement climatique, désertification, déforestation),
- le bien-être animal,
- la gestion de la biodiversité,
- la santé humaine,
- et la sécurité alimentaire.

Mais l'élevage est aussi mis en avant pour sa contribution :

- à la réduction de la pauvreté et de la faim,
- au bon fonctionnement des systèmes agraires intégrant cultures et élevages,
- et à la valorisation des ressources locales des territoires.

De fait, à travers le monde, les élevages sont d'une grande diversité. Celle-ci est définie selon les espèces, les structures d'élevage, les contextes agroécologiques et les niveaux d'intensification (Steinfeld *et al.*, 2006 ; Robinson *et al.*, 2011). Elle s'observe aussi bien à l'échelle globale qu'aux échelles nationales et infranationales. Parler de contribution de l'élevage au développement durable, en particulier de l'agriculture et des territoires, n'a donc guère de sens de façon générale. En effet, cette contribution doit être déclinée selon les types d'élevage et doit ensuite être analysée en fonction des contextes biophysiques et socio-économiques qui peuvent considérablement en modifier le profil et les impacts.

L'objet de ce chapitre introductif est de préciser pourquoi les élevages familiaux de ruminants au pâturage en zones méditerranéennes et tropicales ont été ciblés dans cet ouvrage et d'apprécier, au travers de statistiques disponibles, l'importance de ces élevages dans le monde. Nous pourrons alors analyser comment ces élevages peuvent être des moyens, des contraintes ou des cibles pour le développement durable, en s'appuyant sur les 17 objectifs de développement durable (ODD) définis en 2015 par les États membres de

l'Organisation des Nations unies (ONU). Cette démarche nous permettra de dégager le cadre général d'analyse que nous avons utilisé au cours de la dernière décennie pour organiser les travaux de recherche. Ces derniers sont présentés ici autour de trois thèmes de recherche : *adaptation*, *efficience* et *innovation* des systèmes d'élevage familiaux de ruminants au pâturage en zones méditerranéennes et tropicales.

Les élevages de ruminants au pâturage en zones méditerranéennes et tropicales

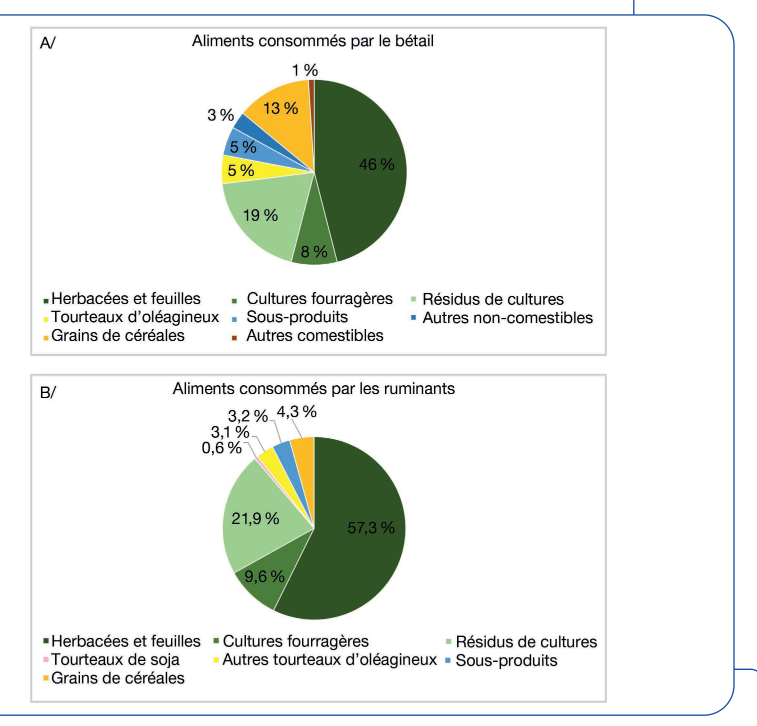
À l'échelle mondiale, les ruminants (bovins, buffles, petits ruminants) représentent 96 % des effectifs d'herbivores domestiques. Les équidés et les camélidés constituent quant à eux une faible part de ces effectifs, mais peuvent être importants régionalement en zones méditerranéennes et tropicales (dromadaires dans les zones arides en Afrique et au Moyen-Orient, camélidés andins en Amérique du Sud, chevaux et ânes utilisés pour la traction animale en Afrique subsaharienne...).

Les élevages de ruminants...

Les élevages de ruminants sont d'importants fournisseurs de denrées alimentaires. Ils contribuent de manière quasiment exclusive aux 883 millions de tonnes de lait produit (FAOSTAT, 2019), dont 81 % proviennent des bovins et 15 % des buffles. En revanche, les bovins et les buffles ne fournissent que 22 % des 337 millions de tonnes de viande, les plus forts contributeurs étant la volaille (39 %) et le porc (33 %).

Pour assurer ces productions, les animaux d'élevage consomment annuellement 6 milliards de tonnes de matière sèche (MS) de ressources alimentaires diverses (figure 1.1). Les ressources fourragères, valorisées principalement par les ruminants, représentent les trois quarts de ces ressources, le quart restant étant des aliments concentrés, dont un tiers consommé par les ruminants et deux tiers par les monogastriques (Mottet *et al.*, 2017 et 2018). Certaines de ces ressources sont consommables par l'homme (grains de céréales, graines de soja...), alors que d'autres ne le sont pas (herbacées et feuilles d'arbres prélevées sur des espaces non cultivés ou résidus de culture). La production de ces ressources occupe 2,5 milliards d'hectares, dont la plus grande partie (près de 2 milliards d'hectares) de « prairies permanentes », ce terme recouvrant une diversité de types de végétations (prairies, savanes, steppes...). Sur ces surfaces de prairies, seuls 685 millions d'hectares seraient cultivables (Mottet *et al.*, 2017). À l'échelle mondiale, les herbivores valorisent donc les végétations spontanées d'un peu moins de 1,5 milliard d'hectares qui ne sont pas cultivables. Le reste des ressources alimentaires sont issues de surfaces cultivées (0,53 milliard d'hectares). Un tiers des surfaces en céréales sont par exemple dédiées à l'alimentation animale.

Figure 1.1. (A) : composition mondiale de la consommation d'aliments par le bétail (6 milliards tMS/an). (B) : composition mondiale de la consommation d'aliments par les ruminants en particulier (4,99 milliards tMS/an). D'après Mottet *et al.*, 2017 et 2018.



Cultures fourragères : ensilage de céréales et légumineuses, betteraves fourragères.
Résidus de cultures : pailles et cannes, tiges, bouts blancs de canne à sucre.
Sous-produits : sons, gluten de maïs, mélasses, pulpes, résidus grains-énergie.
Autres non-comestibles : céréales déclassées, farines de poisson, eaux grasses, acides aminés de synthèse, chaux.
Autres comestibles : pellets de manioc, graines de légumineuses et soja, huile de colza et soja.

L'intérêt des élevages de ruminants est donc notamment lié à la question de la compétition pour les terres agricoles entre la production d'aliments pour les hommes et celle pour les animaux.

La meilleure efficience des monogastriques par rapport aux ruminants en matière de conversion alimentaire est un argument avancé pour privilégier les premiers afin de préserver les écosystèmes naturels en limitant leur utilisation par des herbivores domestiques. La consommation de 1 kg de protéines végétales permet en effet aux monogastriques de produire 0,54 kg de protéines animales pour le poulet de chair et 0,40 kg pour le porc, contre 0,08 à 0,24 kg seulement pour la production de lait ou de viande chez les



ruminants, pour différents systèmes d'élevage français (Laisse *et al.,* 2019). Cependant les monogastriques utilisent une part importante (de 26 à 40 % selon les systèmes) de protéines issues d'aliments consommables par l'homme. Le calcul d'un taux de conversion de protéines non consommables en protéines produites peut alors nettement être à l'avantage de certains systèmes d'élevage de ruminants : 0,88 kg de protéines produites par kilogramme de protéines non consommables pour les poulets de chair contre 1,28 ou 2,17 kg pour les systèmes de ruminants les plus efficients, c'est-à-dire les plus utilisateurs de fourrages, grâce aux fermentations microbiennes des compartiments digestifs (Laisse *et al.,* 2019). Ces résultats sont concordants avec ceux de Mottet *et al.* (2017) qui considèrent cette fois la conversion des protéines consommables par l'homme. À partir des données de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), ces auteurs montrent qu'à l'échelle mondiale, les ruminants consomment 133 kg de matière sèche d'aliments pour produire 1 kg de protéines, contre seulement 30 kg de matière sèche pour les monogastriques. Cependant, le taux de conversion en protéines consommables par l'homme est bien meilleur pour les ruminants : 1,67 kg de protéines produites pour l'utilisation de 1 kg de protéines consommables par l'homme grâce aux fermentations digestives, soit un effet multiplicateur, contre 0,5 kg seulement pour les monogastriques, soit un effet réducteur.

Les élevages de ruminants au pâturage…

Du fait de leur utilisation d'aliments non consommables par l'homme et produits sur des terres qui pour une part importante ne sont pas cultivables, nous nous intéressons plus particulièrement aux élevages de ruminants consommateurs de fourrages grossiers prélevés directement au pâturage.

Concernant les conduites alimentaires, la FAO (Sere et Steinfeld, 1996 ; Campbell *et al.*, 1999 ; Robinson *et al.*, 2011) distingue et cartographie l'élevage mondial en trois grands types :

- les systèmes d'élevage hors-sol (*landless systems* ou *feedlot*) dans lesquels les animaux sont élevés en bâtiment ou en parc, où leur alimentation leur est apportée, et dont les ressources alimentaires proviennent pour moins de 10 % de l'exploitation ;
- les systèmes d'élevage au pâturage (*grazing systems*) pour lesquels plus de 90 % des ressources alimentaires du bétail proviennent de parcours, de prairies ou de fourrages cultivés ;
- les systèmes mixtes agriculture-élevage (*mixed systems*), pour lesquels ces deux types d'activités sont intégrées dans l'exploitation avec plus de 10 % du produit de l'exploitation provenant d'activités non liées à l'élevage et où plus de 10 % des ressources alimentaires des animaux proviennent de sous-produits de culture.

Seuls 3,7 % des effectifs de bovins sont élevés en *feedlot* fournissant 5 % des protéines fournies par les bovins (tableau 1.1). La très grande majorité des ruminants sont élevés dans des systèmes au pâturage et des systèmes mixtes.

Tableau 1.1. Contributions des différents systèmes de ruminants à la production mondiale annuelle totale de protéines consommables (Mottet *et al.*, 2018).

Espèces	Systèmes de production	Effectifs (millions)	Production (t de protéines)	Part de production de protéines par espèce (en %)	Part de la consommation globale de protéines (en %)
Bovins	Pâturants	508,8	10 338 175	35	5,1
	Mixtes	906,4	17 306 165	59	8,5
	Hors-sol	55,3	1 518 764	5	0,7
Buffles	Pâturants	36,4	584 321	15	0,3
	Mixtes	160,7	3 403 574	85	1,7
Petits ruminants	Pâturants	925,7	1 224 623	43	0,6
	Mixtes	1 167,1	1 656 386	57	0,8

Les systèmes au pâturage recouvrent deux grandes situations distinctes, décrites dans le rapport du Groupe d'experts de haut niveau sur la sécurité alimentaire et la nutrition traitant de l'élevage (HPLE, 2016).

La première forme est le pastoralisme. Les systèmes pastoraux sont caractérisés par la mobilité des troupeaux et des hommes, l'utilisation de ressources gérées en commun et l'exploitation d'animaux aptes à valoriser les végétations des terres de parcours. Ces systèmes représentent une des rares opportunités d'activités agricoles dans les zones arides où les précipitations, les ressources en eau et la production de biomasse sur les parcours sont faibles et irrégulières. Le pastoralisme se rencontre principalement dans le monde en développement, et fait vivre plus de 500 millions de personnes (IYRP, 2021). Il est encore présent dans le bassin méditerranéen, à la fois sur la rive nord et sud, même s'il a tendance à régresser. En France métropolitaine, par exemple, le pastoralisme implique 35 000 exploitations « avec un élevage significatif » dont le système fourrager est considéré de type pastoral, soit 18 % de l'ensemble des exploitations. Ce système est particulièrement représenté dans les régions méditerranéennes et montagnardes, qui détiennent près de 1,5 million d'UGB (unité de gros bétail) (Agreste, recensement agricole 2010 – traitement Idele).

La seconde forme d'élevage au pâturage est l'élevage à l'herbe, pratiqué sur des prairies, très généralement clôturées, que ce soient dans les zones de prairies des pays développés ou des pays en développement (PED), ou dans des zones forestières après défriche et implantation de prairies de longues durées (forêt amazonienne par exemple). Des races animales à haute productivité y sont généralement élevées. En complément des prairies permanentes, des fourrages semés avec des espèces améliorées sont également utilisés, avec une dépendance plus ou moins forte à des intrants. La mécanisation

de la récolte et de la distribution des fourrages peut entraîner une diminution de la part des ressources prélevées par pâturage direct dans l'alimentation. L'intensification de ces systèmes à l'herbe et leur impact écologique peuvent varier considérablement selon les biomes (HPLE, 2016 ; Chang *et al.*, 2021).

Par ailleurs, les élevages des systèmes mixtes agriculture-élevage couvrent une grande diversité de situations. Ils sont très nombreux dans les PED, notamment en Afrique et en Asie, où ils sont gérés par de petits exploitants. Les familles élèvent quelques animaux, associant souvent plusieurs espèces : des volailles et des porcs, mais également des ruminants (qui sont notamment utilisés pour la traction). Toutes ces espèces concourent à l'entretien de la fertilité des sols cultivés. Ces petites exploitations produisent de l'ordre de 80 % des aliments consommés par l'homme en Asie et en Afrique subsaharienne (HPLE, 2016). Les ruminants sont alimentés à partir des résidus de culture et de cultures fourragères (pâturés ou distribués en vert ou après stockage), d'herbes issues du désherbage des cultures ou de cueillette sur les bords des chemins et des parcelles. Ils peuvent aussi accéder à des surfaces de parcours. Ainsi, selon les contextes (nombre d'animaux dans l'exploitation, densité de population et occupation des sols dans le territoire), les ruminants peuvent être conduits en stabulation permanente ou bien au pâturage, sur les résidus de culture laissés au champ et sur des surfaces de végétation spontanée. Ces systèmes mixtes se rencontrent également dans les pays développés, avec des dimensions (surfaces, taille des troupeaux) plus importantes, bien qu'ils aient eu tendance à décroître avec la diminution générale du nombre d'exploitations agricoles. Ces faits sont associés à l'agrandissement et à la spécialisation des exploitations et des espaces, dans le mouvement de modernisation de l'agriculture depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, par exemple en Europe.

Les élevages de ruminants au pâturage en agriculture familiale…

Dans cet ouvrage, nous nous intéresserons essentiellement aux élevages conduits en agriculture familiale, qui sont largement dominants à l'échelle mondiale (Bosc et Sourisseau, 2019 ; Cirad, 2013). L'agriculture familiale est définie comme « une des formes d'organisation de la production agricole regroupant des exploitations caractérisées par des liens organiques entre la famille et l'unité de production et par la mobilisation du travail familial excluant le salariat permanent. Ces liens se matérialisent par l'inclusion du capital productif dans le patrimoine familial et par la combinaison de logiques domestiques et d'exploitation marchandes et non marchandes, dans les processus d'allocation du travail familial et de sa rémunération, ainsi que dans les choix de répartition des produits entre consommations finales, consommations intermédiaires, investissements et accumulation » (Cirad, 2013). Cette agriculture familiale coexiste avec deux autres grandes formes d'agriculture :

- l'agriculture d'entreprise qui mobilise uniquement du travail salarié et dont le capital d'exploitation est détenu par des acteurs déconnectés des logiques familiales,
- l'agriculture patronale qui a recours au travail salarié permanent en complément de la main-d'œuvre familiale, mais dont le capital d'exploitation est familial.

Les types d'exploitations agricoles n'étant pas identifiés dans les bases statistiques agricoles à l'échelle mondiale, il est difficile d'apprécier la participation des agricultures familiales au système alimentaire mondial. Quelques éléments peuvent néanmoins être mis en avant. Elles représentent la très grande majorité des agricultures du monde, avec autour de 570 millions d'exploitations agricoles et 1,3 milliard d'actifs agricoles, pour une population agricole totale estimée à 2,6 milliards de personnes (Bosc et Sourisseau, 2019 ; Cirad, 2013). Les agricultures familiales contribuent de façon prépondérante aux revenus et aux moyens d'existence de la population dans de nombreux pays du monde. Il faut cependant aussi considérer l'importance de la pauvreté qui touche ces ménages agricoles. Avec peu de moyens et des surfaces souvent très limitées (85 % des exploitations dans le monde disposent de moins de 2 ha ; Robinson *et al.*, 2011), ces ménages tentent tout d'abord de subvenir à leurs besoins alimentaires, au travers de l'autoconsommation. Leurs activités agricoles contribuent également aux revenus par la vente de surplus, et en particulier de produits animaux. Même si elles sont considérées par certains comme peu productives et donc peu efficaces pour répondre aux enjeux de la sécurité alimentaire mondiale, les agricultures familiales assurent néanmoins l'essentiel de la production alimentaire de base d'origine végétale (céréales, tubercules, bananes plantains) dans le monde. En ce qui concerne les autres productions végétales, la contribution des agricultures familiales serait plus variable : de 40 % pour l'huile de palme à plus de 90 % pour le café, le cacao ou le coton. Les auteurs du rapport du Cirad (2013) n'ont pas tenté d'estimer la contribution des agricultures familiales pour la production des produits animaux. Les études de terrain que nous réalisons nous permettent d'affirmer que les agricultures familiales participent de façon importante à la fourniture de produits animaux. À titre d'exemple, en Inde, premier producteur mondial de lait, celui-ci est fourni par un très grand nombre de petits troupeaux. L'élevage en agriculture familiale fournit également des services pour les productions végétales (fumure, traction) et contribue de ce fait aussi à la sécurité alimentaire.

Les agricultures familiales, ainsi que les activités d'élevage qui y sont développées au sein de systèmes mixtes agriculture-élevage ou des systèmes pastoraux, sont très diverses, notamment en fonction des conditions d'accès aux ressources et des conditions bioclimatiques. Ceci détermine les possibilités de transformations des unités familiales et de leurs activités. Il existe une controverse sur la capacité de l'agriculture familiale à contribuer efficacement aux enjeux de la sécurité alimentaire, tout en assurant la préservation de l'environnement. Ceci est bien un enjeu, et nous verrons dans cet ouvrage que les activités d'élevage, en particulier de ruminants, peuvent être un levier pour y contribuer.

L'élevage de ruminants au pâturage en agriculture familiale dans les zones méditerranéennes et tropicales

Cet ouvrage traite plus particulièrement de l'élevage familial de ruminants au pâturage dans les zones méditerranéennes et tropicales sur lesquelles nos travaux ont été ciblés.

Ces régions méditerranéennes et tropicales détiennent une part très importante du cheptel mondial d'herbivores domestiques (tableau 1.2.) : la très grande majorité des buffles,



des camélidés et des caprins, espèces particulièrement bien adaptées aux contextes des zones arides ou de montagnes ; de l'ordre de 60 à 80 % pour les bovins, les équidés et les ovins. De même, l'élevage dans ces zones participe de façon prépondérante à la production mondiale de lait et de viande (tableaux 1.3 et 1.4). Pour les camélidés et les buffles, la quasi-totalité des productions de lait et de viande est bien sûr issue de ces zones, ces espèces n'étant pas présentes ailleurs dans le monde (ou de façon anecdotique). La zone méditerranéenne contribue de façon prépondérante à certaines productions, notamment le lait de brebis, avec 50 % de la production mondiale. Pour les bovins, avec 22 % du cheptel, le reste du monde (Europe hors Europe méridionale, Amérique du Nord, Asie centrale et orientale, Océanie) produit 53 % du lait de vache (qui alimente notamment le marché mondial des produits laitiers) et 49 % de la viande bovine. Cet exemple montre que, rapporté au nombre de têtes entretenues, l'élevage des zones méditerranéennes et tropicales est globalement moins productif que les élevages des pays développés des zones tempérées. Cette affirmation est cependant fortement atténuée par le fait que les animaux des races élevées en zones méditerranéennes et tropicales sont souvent d'un moindre gabarit (700 kg pour une vache Holstein contre 150 kg pour une vache N'Dama d'Afrique de l'Ouest par exemple). En effet, si la productivité était exprimée en rapport au poids vif entretenu et non à la tête, les écarts de productivité seraient moindres, sans évaluer à ce stade les autres services fournis, qu'ils soient environnementaux, sociaux... (voir chapitre 3 sur l'efficience).

Tableau 1.2. Effectifs d'herbivores, en millions de têtes, dans les zones méditerranéennes et tropicales (FAOSTAT, 2019).

	Bovins	Buffles	Ovins	Caprins	Camélidés	Équidés
Bassin méditerranéen	96	4	194	72	6	13
Afrique subsaharienne	319	0	297	409	27	27
Asie du Sud et Sud-Est	340	178	179	360	1,6	10
Amérique latine[1]	421	2	77	37	9	34
Effectifs mondiaux	1 511	204	1 239	1 094	47	118
Méd. et trop. (%)[2]	78	90	60	80	84	71

1. Amérique centrale, Caraïbes et Amérique du Sud.
2. Part du cheptel des zones méditerranéennes et tropicales dans le cheptel mondial.

Tableau 1.3. Production laitière selon les espèces, en millions de tonnes de lait frais entier, en zones méditerranéennes et tropicales (FAOSTAT, 2019).

	Vache	Bufflesse	Chèvre	Brebis	Chamelle
Bassin méditerranéen	87,5	2,4	4	5,2	0,09
Afrique subsaharienne	24,3	0	2,8	1,4	2,76
Asie du Sud et Sud-Est	127,2	128,3	10	1	0,01
Amérique latine[1]	96,3	0	0,8	0,1	0
Production mondiale	715,9	133,8	19,9	10,6	3,11
Méd. et trop. (%)[2]	47	98	88	73	92

1. Amérique centrale, Caraïbes et Amérique du Sud.
2. Part de la production de lait des zones méditerranéennes et tropicales dans la production mondiale.

Tableau 1.4. Production de viande selon les espèces, en millions de tonnes, en zones méditerranéennes et tropicales (FAOSTAT, 2019).

	Bovins	Buffles	Caprins	Ovins	Équidés	Camélidés
Bassin méditerranéen	5,8	0,4	0,4	1,7	0	0,2
Afrique subsaharienne	5,3	0	1,2	1,1	0	0,3
Asie du Sud et Sud-Est	4,5	3,2	1,7	0,9	0	0
Amérique latine[1]	19,3	0	0,1	0,3	0,2	0
Production mondiale	68,3	4,3	6,3	9,9	0,9	0,7
Méd. et trop. (%)[2]	51	84	54	40	22	71

1. Amérique centrale, Caraïbes et Amérique du Sud.
2. Part de la production de viande des zones méditerranéennes et tropicales dans la production mondiale.

Les régions méditerranéennes et tropicales présentent des contextes biophysiques très variés, avec des histoires agraires plus ou moins longues. Les zones de plaines steppiques en Méditerranée, les zones de savanes intertropicales, les montagnes méditerranéennes et tropicales montrent de fortes variations saisonnières de la période de pousse de la végétation. Ces zones subissent également souvent de fortes variations climatiques interannuelles qui se renforcent avec le changement climatique en cours. Les sociétés qui ont peuplé ces zones, depuis parfois plusieurs millénaires, ont fait évoluer leurs techniques conjointement avec les évolutions de leur environnement. La mobilité des animaux est un des moyens déployés par les élevages pastoraux. Nous pouvons

citer la transhumance entre plaine et montagne dans le bassin méditerranéen, le nomadisme des zones désertiques ou les mouvements pendulaires des zones tropicales entre des pâturages de saison des pluies (avec de l'herbe en croissance et des mares temporaires pour abreuver les animaux) et des pâturages de saison sèche (zones de décrue le long de grands fleuves, comme le Sénégal ou le Niger, ou zones agricoles avec une offre importante de résidus de cultures). Les élevages des systèmes mixtes agriculture-élevage, généralement en zones plus favorables pour les cultures, doivent également faire face à une variabilité saisonnière et vont plutôt jouer sur l'utilisation des résidus de cultures pendant la saison sèche ou encore sur le décalage des cycles de cultures fourragères, comme le Bersim – trèfle d'Alexandrie - utilisé en hiver en plaine méditerranéenne (Égypte), ou l'utilisation de cultures tempérées et tropicales, complémentaires dans un calendrier fourrager, dans les zones de transition entre climat tropical et tempéré, soit en latitude (pampa du sud du Brésil / nord de l'Argentine), soit en altitude (Hautes Terres de Madagascar). Les zones équatoriales ont été marquées quant à elles par un développement plus récent de l'élevage (un siècle, voire quelques décennies). Celles-ci n'étaient pas initialement favorables à l'élevage en raison de contraintes sanitaires importantes (trypanosome, maladies à tiques, stress thermique, milieux fermés, etc.), avant que des politiques volontaristes d'aménagement de ces espaces ne poussent au développement de l'élevage, se traduisant souvent par une déforestation complète des milieux (voir chapitres 3 et 4 sur l'efficience et l'innovation).

La plus grande partie de ces zones géographiques présentent des situations socio-économiques également très variées : beaucoup de pays à faible indice de développement humain (IDH), des pays émergents (Brésil, Inde…), des zones à haut niveau de développement ou faisant partie des pays de l'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE), zones ultramarines de l'Union européenne (UE) par exemple, départements et régions d'outre-mer (DROM) pour la France. Ces situations socio-économiques jouent bien sûr de façon importante sur les conditions de développement de l'élevage et les attentes autour de l'élevage en matière de participation au développement durable.

Les systèmes d'élevage de ruminants au pâturage, par leur emprise et leur rôle dans la valorisation des terres agricoles mondiales, leur contribution aux effectifs d'animaux domestiques, leur part actuelle et potentielle dans l'alimentation des hommes, représentent à la fois un ensemble de leviers majeurs pour contribuer à la nécessaire transition agroécologique de l'agriculture, mais aussi un ensemble de risques dont il faut tenir compte dans une perspective de développement durable de l'agriculture et des territoires. Ces opportunités et risques peuvent être analysés à travers le prisme des ODD prônés par les Nations unies dans la cadre du programme de développement durable (PDD) à l'horizon 2030. Ce dernier propose un cadre commun d'analyse et d'action intéressant et validé à l'échelle internationale pour les années à venir (UN 2015).

Contributions potentielles des élevages de ruminants au pâturage aux ODD et controverses

En septembre 2015, les États membres de l'ONU se sont engagés dans un nouveau programme de développement post-2015, intitulé « *Transformer notre monde : le programme de développement durable à l'horizon 2030* » (PPD). Le nouveau programme se base sur les objectifs du millénaire pour le développement (OMD), 8 objectifs visant à lutter contre la pauvreté que le monde s'était engagé à atteindre au plus tard en 2015 lors du sommet du millénaire de New York en 2000. Le nouveau programme est plus ambitieux et détaillé que le précédent, fixant 17 ODD, déclinés en 169 cibles.

Depuis l'élaboration et la validation de ce PDD et des ODD, le secteur de l'élevage international s'est emparé de ce cadre d'analyse et d'action pour évaluer et promouvoir les contributions actuelles et potentielles du secteur de l'élevage (FAO, 2018a). Dans ce processus, comme mentionné plus haut, le constat est rapidement établi que la diversité des systèmes d'élevage offre une diversité de contributions tant négatives que positives par rapport aux ODD. Dans les débats mondiaux, cela amène d'ailleurs à une certaine compétition sur la légitimité supposée de tel ou tel sous-secteur de l'élevage à contribuer au mieux aux ODD ou même à un ou quelques ODD en particulier, notamment en jouant sur les indicateurs utilisés (voir chapitre 3 sur l'efficience). Ces efforts d'analyse peu coordonnés ou partiels contribuent également en conséquence à une certaine confusion voire à de fausses perceptions de la réalité de ces contributions à la fois dans l'opinion publique mais aussi dans les sphères des décideurs et même des scientifiques.

Dans cet ouvrage, nous avons donc choisi d'utiliser ce cadre des ODD, reconnu à l'échelle internationale et qui doit guider les politiques de développement des années à venir, pour illustrer et analyser comment les élevages de ruminants au pâturage pourraient contribuer à ce programme mondial grâce à leurs atouts et en tenant compte de leurs faiblesses. Les élevages de ruminants au pâturage menés par les familles des zones méditerranéennes et tropicales peuvent effectivement être, selon la FAO (2018a) et nos hypothèses ciblées sur ces systèmes, des leviers pour atteindre certains des 17 ODD, comme la réduction de la pauvreté ou de la faim (tableau 1.5). Ils peuvent aussi être la cible de la réalisation des ODD, quand il s'agit de promouvoir une agriculture durable pour éliminer la faim (ODD2), d'établir des modes de consommation et de production durable (ODD12) ou d'atténuer les effets des changements climatiques (ODD13). Ils peuvent cependant être des contraintes à la réalisation de certains objectifs, selon la façon dont ils sont conduits, avec par exemple des impacts négatifs sur les écosystèmes terrestres (ODD15). Ces élevages sont finalement concernés par 8 ODD sur les 17 (tableau 1.5). Pour les 9 autres ODD, des connexions et impacts indirects peuvent être décrits. Ces 9 ODD nous sont cependant apparus secondaires car ils ne sont pas directement impactés par les activités d'élevage.

Même si ces élevages peuvent potentiellement contribuer à certains ODD, des controverses et des incertitudes demeurent sur leur intérêt pour la réalisation de ces ODD. Pour renforcer leurs contributions effectives, il s'agit donc d'identifier les transformations nécessaires de ces élevages. Nous détaillons ci-dessous pour les 8 ODD qui concernent



directement l'élevage, les contributions potentielles, les questions et incertitudes, ainsi que les enjeux de transformation des élevages de ruminants au pâturage en zones méditerranéennes et tropicales.

Tableau 1.5. L'élevage de ruminants au pâturage en agriculture familiale des zones méditerranéennes et tropicales et l'atteinte des 17 objectifs de développement durable.

	Objectifs de développement durable	L	C	O
1	Éliminer la **pauvreté** sous toutes ses formes et partout dans le monde	↑		
2	Assurer la **sécurité alimentaire** et promouvoir **l'agriculture durable**	↑		O
3	Permettre de vivre en bonne santé et promouvoir le bien-être de tous			
4	Assurer l'accès de tous à une éducation de qualité			
5	Parvenir à **l'égalité des sexes** et autonomiser toutes les femmes et les filles	↑		O
6	Garantir l'accès à **l'eau** et à l'assainissement, gestion durable des **ressources en eau**	↑	↓	
7	Garantir l'accès de tous à des services énergétiques durables			
8	Promouvoir une **croissance économique** soutenue	↑		O
9	Bâtir une infrastructure durable, promouvoir une industrialisation durable			
10	Réduire les inégalités dans les pays et d'un pays à l'autre			
11	Promouvoir des villes et des établissements humains ouverts à tous, sûrs, résilients et durables			
12	Établir des **modes de consommation et de production durables**	↑	↓	O
13	Lutter contre **les changements climatiques** et leurs répercussions		↓	O
14	Conserver et exploiter de manière durable les océans			
15	Préserver et restaurer les **écosystèmes terrestres**	↑	↓	O
16	Promouvoir l'avènement de sociétés pacifiques et ouvertes et l'accès à la justice			
17	Renforcer les moyens pour un partenariat mondial			

L : l'élevage peut être un levier pour atteindre l'objectif (↑).
C : l'élevage peut être une contrainte pour la réalisation de l'objectif (↓).
O : l'élevage est une cible de l'objectif de développement durable (**O**).

L'ODD1 vise à éliminer la pauvreté sous toutes ses formes

L'élevage permet de générer des revenus dans les ménages pauvres, n'ayant éventuellement même pas d'accès à la terre (éleveurs sans terre). En Afrique subsaharienne et en Asie du Sud, 927 millions de personnes vivent dans des ménages pauvres pratiquant l'élevage (HPLE, 2016). L'ODD1 vise également à mettre en place des systèmes et mesures de protection sociale. Dans les pays à faible niveau de développement, la protection des individus repose en grande partie sur les solidarités familiales. Les animaux procurent les revenus nécessaires pour assurer ces solidarités. Ils sont également un capital à mobiliser en urgence pour faire face aux accidents de la vie. Ce capital sur pieds peut également être confié à des familles dans le besoin, celles-ci disposant des produits générés comme le lait, mais devenant aussi propriétaires d'un jeune né sur deux. L'ODD1 vise enfin à renforcer la résilience des pauvres et à réduire leur exposition et leur vulnérabilité aux chocs de tous ordres. L'élevage est une voie de diversification des activités et contribue à la résilience des systèmes mixtes agriculture-élevage. En élevage pastoral, le maintien d'un stock d'animaux conséquent est un autre moyen pour assurer la résilience des ménages, face aux épisodes de sécheresse ou aux épizooties. Ici, les enjeux sont donc de renforcer la contribution de l'élevage à la création de revenus, tout en assurant ses fonctions de protection sociale et en renforçant la résilience des ménages. Cependant, s'il apparaît clairement que la demande globale en denrées d'origine animale est liée à la croissance démographique et économique avec un doublement prévu entre 2006 et 2050 (Steinfeld *et al.,* 2006), tirée par l'accroissement du revenu des classes moyennes, le lien entre la croissance du secteur de l'élevage et la réduction de la pauvreté n'est pas évident (FAO, 2018b). Ces élevages familiaux ne seraient-ils pas des « pièges à pauvreté » du fait des faibles niveaux de production ? Il s'agit donc de trouver des voies pour améliorer l'efficience de ces élevages, mais aussi renforcer les capacités adaptatives à différents niveaux d'organisation (animal, troupeau, ménage, territoire, filière) (voir chapitres 2, 3 et 4 sur l'adaptation, l'efficience et l'innovation).

L'ODD2 vise à éliminer la faim et toutes les formes de malnutrition

Il s'agit en particulier de doubler la productivité agricole et les revenus des petits producteurs. Cet accroissement de la production doit se faire au sein de systèmes de production alimentaires viables et par la mise en œuvre de pratiques résilientes. Au-delà de la contribution au revenu des ménages, l'élevage fournit des denrées alimentaires d'origine animale, apportant de façon concentrée des nutriments et micronutriments essentiels. Il fournit des services aux systèmes agricoles, au travers de la fumure et de la traction animale, contribuant ainsi à la production de denrées végétales. L'élevage de ruminants au pâturage peut ainsi être un levier important pour assurer la transition agroécologique des systèmes de production agricole, dans le cadre de la promotion d'une agriculture durable que vise aussi l'ODD2. Il s'agit également de préserver la biodiversité domestique et favoriser l'accès aux ressources génétiques et aux savoirs associés.

L’utilisation par les petits producteurs de ressources animales et végétales bien adaptées localement contribue effectivement à la préservation de ces ressources et à la résilience des systèmes de production. Cependant, ces races, qui présentent des capacités d’adaptation intéressantes, permettent-elles d’assurer l’accroissement attendu de la production (voir chapitre 2 sur l’adaptation) ? L’utilisation de terres pour l’alimentation des ruminants est également remise en question car celles-ci seraient moins efficientes qu’en situation de production de denrées végétales pour l’alimentation humaine. Des risques pour la santé, liés à la consommation de produits animaux, sont également mis en avant. Dans les ménages pauvres des pays en développement, l’élevage de ruminants joue un rôle important pour la production alimentaire. La consommation d'aliments d’origine animale dans les pays émergents et les pays en développement devrait permettre d'améliorer considérablement la sécurité alimentaire et la nutrition (HPLE, 2016). Ici aussi, les défis sont d’accroître l’efficience de l’utilisation des ressources par ces élevages – pour produire davantage sans augmenter d’autant les ressources utilisées –, et de renforcer leur résilience.

L’ODD5 vise à parvenir à l’égalité des sexes et à autonomiser les femmes et les filles

Cela passe notamment par la promotion du partage des responsabilités dans le ménage et la famille et par l’accès, en toute égalité, aux fonctions de direction dans la vie politique, économique et publique. Selon les contextes nationaux, les activités d’élevage, notamment pour des espèces à cycles courts (volailles, porcs, petits ruminants), de transformation et de commercialisation des produits animaux (en particulier le lait) sont pratiquées par les femmes et leur assurent une certaine autonomie économique et décisionnelle au sein des ménages. Cependant, les dynamiques d’intensification de la production et de structuration des circuits de commercialisation favorisent souvent la prise de contrôle par les hommes. Si l’élevage peut effectivement contribuer à l’autonomie économique des femmes, l’enjeu est de maintenir une part équitable aux femmes dans les décisions de gestion des activités et l’utilisation des revenus générés.

L’ODD6 vise à garantir l’accès de tous à l’eau et à l’assainissement et à assurer une gestion durable des ressources en eau

Il s’agit notamment d’améliorer et de rationaliser l’utilisation des ressources en eau dans tous les secteurs, de mettre en œuvre une gestion intégrée des ressources en eau et de protéger et restaurer les écosystèmes liés à l’eau, notamment les montagnes, les forêts et les zones humides. Selon les conduites mises en œuvre, l’élevage de ruminants au pâturage, utilisateur d’espaces peu anthropisés, peut être une opportunité pour la protection des écosystèmes liés à l’eau, par exemple les montagnes ou les zones humides. Cependant, il peut également être une menace. D’un point de vue quantitatif, les productions de viande de ruminants ou de lait sont critiquées pour leur consommation importante

d'eau, mais ceci fait l'objet d'une forte controverse liée au mode de calcul. L'élevage peut aussi être une source de pollution des eaux, même ponctuellement, dans les zones où la densité animale est forte. L'enjeu est donc ici d'assurer un accès et une gestion durable de l'eau et des écosystèmes liés à l'eau, dans les espaces où se déploient les élevages de ruminants. Ceci concerne les aménagements d'hydraulique pastorale, par la protection et l'utilisation des parcours pour entretenir le cycle de l'eau. Dans les territoires à vocation pastorale, ces aménagements et ces parcours sont très généralement partagés. Des programmes d'aménagement et de gestion participative peuvent être des leviers intéressants pour assurer accès et gestion durable des ressources en eau.

L'ODD8 vise à promouvoir une croissance économique soutenue, partagée et durable, le plein emploi et un travail décent pour tous, tout en mettant fin au travail des enfants sous toutes ses formes

Le secteur de l'élevage peut être un contributeur important à la croissance économique, à la fois par la production, mais également par les emplois générés en amont (agrofournitures) et en aval (agroalimentaires). Certaines formes d'élevage assurent la création d'une forte valeur ajoutée et demandent une forte intensité en travail, intéressante pour assurer le plein emploi. La contribution économique de l'élevage est cependant souvent sous-estimée, une partie de ses contributions n'étant pas prises en compte (Dutilly *et al.*, 2020). Étant donné son importance dans certains pays, 12 % du produit intérieur brut (PIB) et 21 % des exportations par exemple pour le Niger, les enjeux de maintien de la croissance du secteur de l'élevage sont cruciaux. Cependant, certaines tâches d'élevage restent réalisées par des enfants, avec une déscolarisation fréquente, les conditions d'accès à l'éducation pouvant être difficiles pour les familles en zones pastorales. Selon les contextes, un ensemble de conditions doivent être améliorées, comme la sécurité, l'accès au marché ou au crédit pour les familles d'éleveurs. L'enjeu est également d'atteindre un niveau élevé de productivité économique en élevage, notamment en favorisant l'innovation.

L'ODD12 vise à établir des modes de consommation et de production durables

Il s'agit de gérer plus efficacement les ressources naturelles, d'améliorer le traitement des déchets toxiques et de réduire le gaspillage alimentaire, notamment en réduisant les pertes de produits alimentaires au long des chaînes d'approvisionnement. L'élevage de ruminants est bien sûr concerné par la question de la gestion des ressources naturelles, que ce soit dans les espaces agricoles utilisés pour produire des aliments pour le bétail ou dans les écosystèmes peu anthropisés parcourus par les herbivores domestiques ou impactés par la proximité des zones d'élevage. Il est également concerné par l'utilisation de produits de synthèse, en particulier pour la reproduction (hormones de synthèse)

ou la santé (antibiotiques), mais également pour la production des aliments du bétail. Une large gamme de niveaux d'utilisation d'intrants existe pour les élevages de ruminants au pâturage dans les espaces méditerranéens et tropicaux. Un premier enjeu est de conforter, dans leur diversité, des modes de production durables en élevage de ruminants, utilisateurs de ressources locales et de sous-produits de l'agro-industrie alimentaire, et de réduire les pertes des produits sensibles. Un autre enjeu est de faire reconnaître ces modes de production auprès des consommateurs, au travers des aliments d'origine animale qui en sont issus, par exemple par des labélisations, qui pourraient concerner les valeurs nutritionnelle et culturelle ou les impacts sur l'environnement.

L'ODD13 vise à lutter contre le changement climatique et ses répercussions

Les familles pratiquant l'élevage en zones méditerranéennes et tropicales sont particulièrement touchées par le changement du climat et les événements climatiques extrêmes de plus en plus fréquents. L'enjeu est de renforcer leurs capacités d'adaptation, en considérant les leviers possibles à différents niveaux d'organisation (troupeaux, ménages, communautés d'éleveurs…). La mobilité des animaux, à plus ou moins grande distance, est par exemple un des leviers en élevage agropastoral pour faire face à des épisodes de sécheresse, mais celle-ci peut être remise en question pour différentes raisons (sécurité, contexte sanitaire, accès au foncier, etc.). L'élevage de ruminants a également un rôle à jouer dans l'atténuation du changement climatique, en limitant les émissions de gaz à effet de serre, et en favorisant le stockage de carbone dans les sols couverts de végétation utilisés pour le pâturage. Un premier enjeu est de mieux préciser la contribution de ces élevages au pâturage aux processus d'émission et de stockage, en affinant les méthodes d'évaluation. Celles-ci peuvent donner des résultats très différents, selon le périmètre des systèmes pris en compte, les unités fonctionnelles pour exprimer les flux, et être plus ou moins précises selon les méthodes d'estimation (voir chapitre 3 sur l'efficience). L'autre enjeu est de développer de nouveaux modes de production qui favorisent le stockage de carbone et limitent les émissions de gaz à effet de serre (GES), tout en assurant les autres attentes sur ces modes de production : contribuer à la réduction de la pauvreté (ODD1) et à la sécurité alimentaire (ODD2) (voir chapitre 4 sur l'innovation).

L'ODD15 vise à préserver et restaurer les écosystèmes terrestres, en veillant à les exploiter de façon durable

Les forêts, les zones humides, les montagnes et les zones arides, écosystèmes où l'activité d'élevage agropastoral se déploie en zones méditerranéennes et tropicales, sont particulièrement visées. Il s'agit également de lutter contre la désertification, d'inverser le processus de dégradation des terres et de mettre fin à l'appauvrissement de la biodiversité. Rappelons que l'élevage d'herbivores utilise près de 1,5 milliard d'hectares qui ne seraient pas cultivables (Mottet *et al.*, 2018). Selon les conduites mises en œuvre, les effets du pâturage

par les herbivores domestiques sur les écosystèmes peuvent être variés, positifs lorsqu'il permet le maintien et la protection de milieux ouverts et des habitats associés abritant une biodiversité sauvage, ou au contraire négatifs lorsqu'il renforce des dynamiques d'érosion, de désertification et d'embroussaillement. L'extension des terres cultivées pour l'alimentation des troupeaux est une autre dynamique négative par rapport à la préservation des écosystèmes. Des modes de gestion de l'élevage au pâturage sont ainsi remis en question. La gestion collective de terres de parcours peut conduire en cas de contraintes spatiales ou économiques trop fortes au surpâturage, avec dégradation des terres et perte de biodiversité. L'intensification de la gestion des prairies (augmentation du chargement, du niveau de fertilisation…) peut mener à une réduction des services rendus par ces prairies. L'enjeu est donc de conforter des modes de gestion durable des espaces de parcours et de prairies, ainsi que des services qui y sont associés. Ceci passe tant par des aspects techniques qu'organisationnels et politiques, comme les moyens d'une intensification écologique des élevages agropastoraux pour limiter les mises en culture, la transmission de savoirs pastoraux pour maîtriser l'alimentation des troupeaux et le renouvellement des ressources, ou encore l'assurance d'un accès équitable aux terres de parcours pour les familles d'éleveurs.

Pour ces huit ODD qui concernent directement les élevages au pâturage dans différents contextes agroécologiques et socio-économiques, nous identifions donc des enjeux et questions qui montrent le besoin de préciser leurs contributions au développement durable. Les données et résultats scientifiques permettant de préciser ces contributions sont souvent incomplets ou font défaut aujourd'hui car par le passé, ces élevages n'ont pas reçu autant d'effort de recherche que d'autres systèmes d'élevage. Les controverses ne manquent pas, liées d'une part au défaut de connaissances sur ces élevages, mais aussi à des analyses parfois incomplètes (périmètre du système analysé dans le cas du changement climatique par exemple), parfois subjectives ou orientées (choix d'indicateurs favorisant d'autres types d'élevage comme les émissions de GES en fonction du niveau de production), parfois politiques (choix subjectif d'un modèle de développement). Nous identifions cependant de nombreux leviers qui permettraient d'améliorer cette contribution en favorisant les travaux de recherche sur ces systèmes. Notre objectif dans la suite de cet ouvrage est d'alimenter, à travers les travaux réalisés ces dernières années par notre collectif et ses partenaires, les connaissances sur les élevages familiaux de ruminants au pâturage en milieux méditerranéens et tropicaux et de préciser ainsi leur potentielle contribution au développement durable.

Un cadre général pour mener des recherches sur la contribution des élevages au pâturage au développement durable

Les travaux et résultats de recherche sur ce thème général qui seront présentés dans les chapitres suivants ont été développés autour de trois thèmes que nous avons identifiés pour leur capacité à répondre aux principaux enjeux auxquels ces systèmes



d'élevage doivent faire face : i) l'adaptation aux changements, ii) l'amélioration de leurs efficiences, iii) l'innovation pour la transition agroécologique (TAE).

Les enjeux liés à l'adaptation des systèmes d'élevage au pâturage

Dans le programme de développement post-2015, l'urgence des mesures à prendre concernant l'adaptation au changement climatique est mise en avant (ODD13), et la résilience face à ces changements est ciblée dans 6 ODD. La biodiversité, à la fois sauvage et domestique, est également pointée comme un moyen pour contribuer à cette résilience, mais ce sont également des pratiques agricoles ou des infrastructures qui peuvent la conforter. Au-delà de la question de l'adaptation au changement climatique, notre analyse de la contribution de l'élevage au pâturage aux ODD montre que celui-ci est un moyen pour réduire la vulnérabilité des personnes ou des ménages pauvres, afin de faire face à d'autres accidents ou chocs (maladies) ou aux évolutions des conditions socio-économiques de l'exercice de leurs activités d'élevage (marchés, politiques publiques, accès au foncier ou à l'eau, etc.). Dans ce contexte de changements et d'incertitudes, la réalisation d'objectifs de réduction de la pauvreté et d'amélioration de la sécurité alimentaire et nutritionnelle nécessite de mobiliser un ensemble de capacités adaptatives pour faire face aux différents aléas et tendances d'évolution. Ces capacités adaptatives sont variées et relèvent de plusieurs niveaux d'organisation des activités d'élevages en elle-même (de l'animal au territoire dans lequel se déplacent les troupeaux) et plus globalement de l'activité des ménages (système d'activités, relations aux autres ménages et institutions). Quelles sont les modalités d'adaptation mises en œuvre par les familles dans le passé pour faire face aux aléas ou aux tendances auxquelles elles ont été confrontées ? Quelles ont été les transformations des activités qui en ont découlé ? Quelles capacités d'adaptation peuvent être renforcées et comment?

Les enjeux liés à l'amélioration de l'efficience des systèmes d'élevage au pâturage

Pour éliminer la pauvreté et la faim, le plan de développement post-2015 met en avant la nécessité d'augmenter la productivité et la production dans le cadre d'une agriculture durable qui préserve les écosystèmes. Dans un monde fini, le développement de l'élevage familial de ruminants au pâturage en zones méditerranéennes et tropicales, nécessite donc d'assurer une bonne utilisation des ressources nécessaires pour produire. Raisonner l'augmentation de la production, c'est donc penser l'efficience des systèmes, celle-ci mettant en regard les résultats obtenus et les ressources utilisées pour les atteindre. Cette efficience peut être considérée d'un point de vue technique, en s'intéressant à l'efficience de l'utilisation des ressources, mais aussi plus globalement d'un point de vue économique, en intégrant les différents *inputs* et *outputs*. Pour satisfaire ces objectifs, la question de la disponibilité des aliments (réduire la faim) ou de la croissance

(réduire la pauvreté) n'est pas suffisante : les ODD mettent aussi en avant la question de l'accès pour tous et de la répartition équitable. Il est donc également nécessaire de mesurer l'efficience d'un point de vue social. Enfin, dans le contexte actuel de changement climatique, le développement de l'élevage n'est plus envisageable sans l'évaluation de l'efficience énergétique des systèmes agricoles. L'évolution et la contrainte des enjeux environnementaux impliquent une prise en compte élargie des ressources dans le rapport d'efficience. Il ne s'agit plus seulement d'optimiser l'utilisation des ressources par unité de produits, mais de considérer globalement les notions des biens et services (et dis-services) vis-à-vis de l'environnement.

Comme les capacités adaptatives, ces différentes catégories d'efficiences se construisent à différents niveaux d'organisation. Comment s'élaborent ces efficiences techniques, économiques et sociales à différents niveaux ? Quels sont les points critiques qui limitent ces efficiences, et à quels niveaux d'organisation ? Comment améliorer ces efficiences ?

Les enjeux liés à l'innovation par les systèmes d'élevage au pâturage

Renforcer les capacités adaptatives et améliorer les efficiences pour les élevages de ruminants au pâturage nécessitent que les familles qui mènent ces activités fassent évoluer leurs systèmes de production. Ces évolutions peuvent correspondre à différents phénomènes, comme (i) la diffusion de techniques déjà connues et éprouvées localement ou (ii) l'adoption de façons de faire nouvelles pour une communauté, issues d'une mise au point réalisée dans cette communauté, par innovation endogène, ou provenant au contraire de l'extérieur, avec le passage d'une innovation d'une région à une autre ou l'appropriation d'inventions issues de la recherche. Les processus d'élaboration et de dissémination des innovations sont complexes et un grand nombre d'acteurs peuvent y prendre part. Les domaines d'innovation en élevage sont également nombreux (Ingrand *et al.*, 2014) et concernent tant des aspects de techniques de production que d'organisation des activités à l'échelle des familles ou des collectifs et des filières. Quels sont, à partir des travaux menés sur les capacités d'adaptation et les efficiences, les domaines d'innovation à renforcer pour contribuer à la transition agroécologique des systèmes d'élevage ? Comment innover dans ces domaines, en associant l'ensemble des acteurs qui peuvent y contribuer (chercheurs, conseillers, éleveurs, décideurs politiques) ? Comment renforcer les systèmes d'innovation pour favoriser l'émergence de nouvelles façons de faire, pour saisir de nouvelles opportunités ou faire face à de nouvelles contraintes ?

Ces trois séries d'enjeux et de questions peuvent se résumer en trois macroquestions qui ont guidé notre projet scientifique et nos travaux récents au cours des années 2015 à 2020 :

- Comment renforcer les capacités d'adaptation des élevages familiaux méditerranéens et tropicaux pour répondre aux changements climatiques, sociaux, économiques ?
- Comment améliorer l'efficience des activités d'élevage au pâturage à différentes échelles et aux plans social, économique et environnemental ?



• Comment contribuer aux processus d'innovation pour la transition agroécologique des élevages familiaux au pâturage méditerranéens et tropicaux ?

Les travaux de recherche, d'expertise et de formation autour de ces trois macroquestions ont alimenté cet ouvrage. Ils ont abordé différents niveaux d'organisation des activités des familles pratiquant l'élevage, avec trois niveaux privilégiés : (i) les processus biotechniques à l'échelle des animaux ou groupes d'animaux et les ressources alimentaires qu'ils mobilisent, (ii) le fonctionnement des élevages (troupeaux, surfaces, pratiques d'élevage) à l'échelle des familles, (iii) le développement des élevages et des filières dans les territoires.

Différentes postures de recherche ont été mobilisées, avec (i) des approches analytiques en domaines expérimentaux (essentiellement en France méditerranéenne) et *in situ* (chez et avec les éleveurs), (ii) des analyses compréhensives des transformations des élevages dans une diversité de terrains en zones méditerranéennes et tropicales, (iii) des évaluations quantitatives pour apprécier la contribution des élevages à différents processus en matière d'économie ou d'environnement (sous forme de modèles et d'outils), (iv) des approches de recherche-action où la recherche participe à des processus de transformation ou d'innovation en produisant des connaissances utiles pour accompagner les acteurs dans ces processus. Les objets et les postures de recherche correspondent à un ensemble de disciplines scientifiques qui ont été mobilisées au travers de nombreux contrats de recherche, dans des travaux disciplinaires ou interdisciplinaires. Les trois macroquestions se répondent bien évidemment, et les contrats de recherche ont souvent abordé deux ou trois de ces macroquestions simultanément.

À partir de l'ensemble de ces résultats scientifiques, publiés ces dernières années, nous proposons dans les trois chapitres suivants de faire le point sur les réponses que nous pouvons apporter à ces trois macroquestions. Il s'agit de mettre en regard les faits saillants obtenus sur différents terrains, à partir de postures, de méthodes et d'objets de recherche variés. L'objectif est également d'apprécier plus précisément la contribution au développement durable et les leviers mobilisables pour renforcer cette contribution des élevages familiaux de ruminants au pâturage des zones méditerranéennes et tropicales. Il s'agira enfin d'identifier les pistes de recherche nécessaires et prometteuses pour améliorer les connaissances sur ces systèmes d'élevage incontournables et aux qualités indéniables, mais qui font encore l'objet de sous-investissements tant scientifiques qu'en appui au développement.

2. Adaptation aux changements locaux et globaux des systèmes d'élevage au pâturage

Claire Aubron, Christian Corniaux, Laurence Flori



Introduction

Si le concept d'adaptation en tant que processus et produit des processus évolutifs a fait l'objet d'un intérêt constant depuis le XIXe siècle en biologie, sa discipline d'origine (Simonet, 2009), ce n'est que depuis quelques décennies que les sciences agronomiques au sens large s'en sont emparées. Bien qu'il soit difficile d'en donner une définition communément partagée au sein de ce champ scientifique, on peut comprendre l'adaptation comme une action consistant à s'accommoder aux circonstances et à composer avec elles.

Dans la lignée des approches systémiques et des travaux sur la résilience des systèmes auxquels elles se rattachent de manière plus ou moins explicite, les recherches sur l'adaptation en agriculture se démarquent au sein des sciences agronomiques par la vision dynamique qu'elles ont de leurs objets et par la prise en compte de la complexité des interactions en jeu dans l'adaptation, dans une perspective holistique (Darnhofer, 2014). Inscrits dans ce courant, de nombreux travaux se sont intéressés à l'adaptation en élevage au cours des deux dernières décennies (par exemple Ancey *et al.*, 2013). La complexité des interactions sur lesquelles repose l'activité d'élevage, en particulier lorsqu'il est conduit au pâturage, n'est sans doute pas étrangère à ce développement : la diversité des espèces et des races de ruminants domestiques, le comportement alimentaire et la physiologie des animaux d'élevage, la disponibilité des ressources fourragères dans le temps et dans l'espace, la mobilité des troupeaux, les divers fonctions et produits issus de l'élevage, les filières et marchés dans lesquels il s'insère, sont autant d'éléments en interaction sur lesquels peuvent porter les adaptations. Ils constituent autant de leviers pour faire face à un contexte contraint et mouvant, notamment aux plans climatique et économique (Rigolot *et al.*, 2019).

Le champ est large et les recherches sur l'adaptation en élevage sont en conséquence diverses. Une première clé de lecture de la variété de ces travaux peut être fournie par les réponses à une série de questions découlant du terme même d'adaptation. Adaptation *de quoi* ? L'animal

(l'individu, le troupeau, la population, l'espèce), la plante (l'individu, la prairie), la ferme et le collectif d'éleveurs sont autant d'objets potentiellement concernés par l'adaptation qui renvoient à des échelles d'analyse et à des disciplines diverses et éventuellement combinées. Adaptation *à quoi* ? On peut ici distinguer les aléas et les risques, d'un choc au caractère plus soudain (par exemple l'arrivée d'un prédateur) ou encore d'un ensemble de changements relativement continus comme le changement climatique ou la mondialisation. L'échelle et le pas de temps considérés dans l'étude des adaptations varient en conséquence. La nature des perturbations à l'origine de l'adaptation – climatiques, environnementales, techniques, économiques, politiques, sociales, etc. – induit également une diversité dans les travaux. Quelle est l'*ampleur* de cette adaptation ? On peut reprendre ici les trois niveaux distingués dans l'étude de la résilience (Darnhofer, 2014) : (i) l'entité considérée absorbe la perturbation et persiste en restant la même ; (ii) l'entité est légèrement modifiée par la perturbation ; (iii) l'entité se transforme radicalement en réaction à la perturbation.

Une autre clé de lecture des recherches sur l'adaptation en élevage consiste à opérer une distinction en fonction de l'importance accordée aux *processus*, aux *propriétés* ou aux *résultats* de l'adaptation (Gasselin *et al.*, 2020). Celles centrées sur les processus étudieront par exemple les trajectoires d'adaptation des animaux ou des élevages, là où celles s'intéressant aux propriétés analyseront leurs capacités de réaction, en tenant compte par exemple de leur dotation en ressources ou de leurs capacités à apprendre (Chia et Marchesnay, 2008). Des recherches portant sur les résultats de l'adaptation se pencheront quant à elles par exemple sur les effets positifs et négatifs de l'adaptation par rapport au développement durable.

Ce chapitre a pour objectif d'illustrer la richesse de ces travaux sur l'adaptation des élevages au pâturage. Nous avons pour cela sélectionné cinq ensembles de résultats issus des recherches conduites par les chercheurs de l'UMR Selmet au cours des dernières années qui s'intéressent à une question, une approche ou un objet original par rapport à l'adaptation : diversité et adaptation des couverts végétaux pâturés au changement climatique, leviers physiologiques mobilisés par l'animal, diversité génétique et adaptation des ressources génétiques animales locales à leurs milieux d'élevage, capacités d'adaptation des ménages pastoraux et des collectifs d'éleveurs et trajectoires d'adaptation des élevages dans les territoires. L'ensemble permet de nourrir une réflexion sur l'adaptation en élevage pâturant en mettant en exergue les différents leviers et processus en jeu dans l'adaptation, et en analysant les limites de celle-ci.

Adaptation de la végétation des pâturages méditerranéens et tropicaux

Simon Taugourdeau, Johann Huguenin

Les systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux reposent à des degrés variables sur la végétation pastorale comme source d'alimentation. La dynamique de la végétation est influencée par de nombreux facteurs tels que les conditions biophysiques (dont les aléas

climatiques), les pratiques d'élevage, l'évolution des cheptels, la mise en culture des terres de parcours, etc. Elle peut s'adapter à des changements selon deux processus :

• l'adaptation intraspécifique : une même espèce végétale peut modifier son fonctionnement pour s'adapter aux changements de conditions par des modifications morphologiques, physiologiques ou phénologiques.

• l'adaptation interspécifique : la composition botanique peut être modifiée pour permettre à la végétation de s'adapter aux changements ; cette adaptation peut se traduire simplement par une modification des abondances des espèces ou par une apparition ou une disparition d'espèces.

Ces adaptations ont ensuite des impacts sur les caractéristiques de la végétation des pâturages, y compris la valeur pastorale (biomasse, valeur nutritive). La compréhension de l'adaptation de la végétation aux changements globaux peut permettre de prédire la trajectoire de la valeur pastorale.

Au Sahel, l'utilisation de données historiques permet de comprendre l'adaptation de la végétation des parcours aux sécheresses

Au Sahel, le pastoralisme repose principalement sur la végétation de steppes et de savanes. Le Sahel a subi des épisodes sévères de sécheresse en particulier entre les années 1970 et 1990 avec des réductions fortes de la pluviométrie pendant plusieurs années d'affilée. Depuis, on assiste globalement à un retour des pluies. Dans le cadre du pôle pastoralisme et zones sèches[1], de nombreux travaux sont conduits depuis plusieurs décennies pour étudier la réponse de la végétation, aussi bien de la strate herbacée (Ndiaye *et al.*, 2015) que de la strate ligneuse (Diouf *et al.* 2002; Sarr *et al.* 2013).

Changement des communautés des savanes sahéliennes suite aux épisodes de sécheresse

Des travaux récents combinent à la fois des données satellitaires et des données historiques de relevés botaniques dans le nord du Sénégal. Les variations des communautés ligneuses avant, pendant et après la période de sécheresse sont étudiées (Dendoncker *et al.*, 2020). Ce travail a reposé en partie sur l'utilisation de bases de données historiques de la végétation, en particulier la base Flotrop (Taugourdeau *et al.*, 2019) qui contient plus de 340 000 observations de plantes entre le 5e et le 25e parallèle nord pour le continent africain entre 1920 et 2012 (figure 2.1). Ces données sont en accès libre sur le GBIF[2].

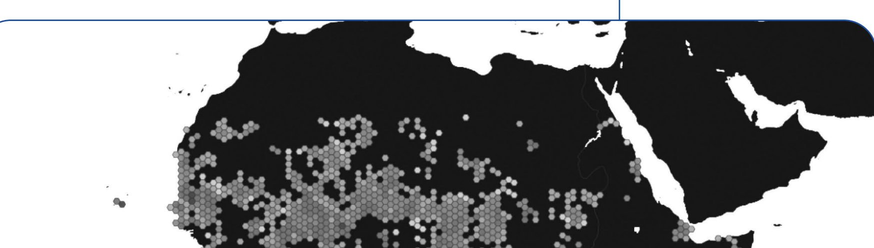
Ces travaux montrent que la densité des arbres diminue entre 1965 et 2008 mais reste stable entre 2008 et 2018 (autour de 10 arbres par hectare). Cependant, de fortes modifications de la composition en espèces ont été notées, indiquant une modification interspécifique des communautés ligneuses. De nombreuses espèces ont des abondances qui

1. www.ppzs.org.
2. www.gbif.org/dataset/eb605c7a-a91c-4ab8-a588-85d0ccb2be9e.



ont diminué à cette période. Une seule espèce *Acacia tortilis* est en augmentation entre les deux périodes. La flore ligneuse dans la région est donc moins diversifiée et sans doute moins résiliente. Différents facteurs interviennent dans cette dynamique, comme le pâturage et les activités humaines qui limitent entre autres le recrutement des nouveaux arbres.

Figure 2.1. Répartition des données Flotrop (GIBF, 2019).



L'intensité des points représente la densité de données des relevés botaniques mis en ligne. Plus l'intensité est forte, plus la densité est élevée.

Étude de l'adaptation intraspécifique à l'aide des herbiers

Les données historiques sont également conservées sous la forme d'échantillons en herbier. Les herbiers permettent l'étude des changements de flore (adaptation interspécifique) mais peuvent être aussi utilisés pour identifier les variations au sein des espèces, en particulier de certaines caractéristiques morphologiques comme la surface de feuilles à partir d'images de ces échantillons. Sur des espèces typiques du Sahel, nous avons mesuré les surfaces de feuilles sur les images disponibles sur le site de Recolnat[3]. Pour exemple, il existe une relation entre la surface de feuille de *Zornia glochidiata* et l'indice de pluviométrie au Sahel (figure 2.2). Pour cette espèce annuelle, la surface était plus faible lors des années de sécheresse, montrant une adaptation morphologique à la pluviométrie.

Il serait intéressant de pouvoir effectuer des travaux similaires sur d'autres variables que la surface, en particulier les caractéristiques chimiques. Cependant, ces mesures sont pour le moment destructives. On est donc confronté à un dilemme entre la production de données et la conservation d'échantillons. Il serait intéressant de développer des méthodes indirectes pour ne pas abîmer les échantillons. Des analyses par spectrométrie dans le proche infrarouge sur les herbiers sont en cours pour essayer de faire des évaluations indirectes des mesures biochimiques (méthode non destructive) (Svensk *et al.*, 2018).

3. www.recolnat.org/.

Figure 2.2. Relation entre la surface de feuille de *Zornia glochidiata* mesurée sur herbier et l'indice de pluviométrie au Sahel.

Surface moyenne d'une feuille de *Z. glochidiata* en cm²
$R^2 = 0{,}32^{***}$
0,5
1,0
1,5
2,0
–1
0
1
2
Indice pluviométrique annuel du Sahel au XXe siècle

Impact des pratiques d'élevage sur l'adaptation de la végétation et la dégradation des steppes au Maghreb

Les steppes du Maghreb se situent entre les isohyètes 100 et 400 mm·an^{-1} et sont couvertes d'une végétation basse et clairsemée. La graminée symbolique *Stipa tenacissima* se développe sur sols peu profonds drainés, par voie végétative. Elle représentait 90 % de la phytomasse (5 à 10 t^{-1}·an^{-1}, avec 20 % en vert). Les steppes couvertes en *Lygeum spartum* ont une amplitude écologique plus large et sont liées aux voiles sableux (260 ± 120 kg MS·ha^{-1}·an^{-1}). Elle remplace *S. tenacissima* accompagnée de ligneux bas (*Artemisia*, *Salsola*, etc.). En zones de désertification où les voiles sableux atteignent 15 cm, *Stipagrostis pungens* se développe (Hirche *et al.*, 2018). Les steppes à arbrisseaux représentaient d'importantes surfaces, comme celles à *Artissima herba-alba*, appréciée pour sa valeur pastorale (Aïdoud *et al.*, 2006).



Les steppes du Maghreb sont soumises à une exploitation humaine très ancienne via l'élevage extensif d'ovins et de caprins complété par la culture itinérante des céréales (Aïdoud *et al.*, 2006). Au cours du XXe siècle, cet élevage a connu des mutations sous l'effet de l'évolution de la démographie, de l'expansion des cultures dans des terres de parcours, de la croissance du cheptel, de l'évolution de l'accès aux ressources, des sécheresses prolongées, de nouvelles pratiques d'élevage (apport de concentré et mobilité aléatoire par exemple), des modes de vie des sociétés pastorales (scolarisation par exemple), du contexte économique et des politiques rurales (Bencherif, 2018 ; El Bilali *et al.*, 2020). Les mises en culture (principalement en céréales et arboriculture) et l'ensablement puis la désertification des zones les plus sollicitées des steppes ont induit une diminution de plus de 25 % de leurs surfaces (Hirche *et al.*, 2018).

Impact des changements de pratiques sur la végétation des steppes

De nombreux facteurs ont affaibli les végétations pastorales steppiques, à commencer par les sécheresses plus prononcées, mais surtout les facteurs anthropiques : mise en culture des terres de parcours, augmentation du cheptel, etc. (Bencherif, 2018 ; El Bilali *et al.*, 2020 ; voir aussi *Trajectoires d'adaptation des élevages dans les territoires* dans ce chapitre).

Lors d'études dans des terroirs qui présentaient une homogénéité pédoclimatique, nous avons relevé une hétérogénéité spatiale des formations végétales à *Stipa tenacissima, Lygeum spartum* et *Stipagrostis pungens*. Dans un même territoire, la dégradation se traduit par la disparition de la formation à *S. tenacissima,* et l'apparition de la formation à *L. spartum*, avec aggravation de la dégradation de cette formation qui disparaît aussi pour laisser place à la formation à *S. pungens*. Il s'agit d'une succession écologique régressive caractéristique des végétations pastorales steppiques sous fortes contraintes. Dans les terroirs d'étude, chacune de ces formations végétales se répartissait de façon différente dans l'espace, comme un patchwork. Après avoir décrit les droits d'accès à la pâture pour chaque éleveur du « terroir », nous avons pu établir des relations entre le zonage des différentes formations végétales et leur mode d'exploitation. Ainsi, les agropasteurs qui ne disposaient que d'un parcours de 0,25 ha à 0,5 ha.tête^{-1} ovine et qui n'avaient pas de moyen pour transhumer avaient le plus souvent des pâturages très dégradés à *S. pungens*. En revanche, les agropasteurs qui disposaient de plusieurs parcours et qui effectuaient des transhumances gardaient généralement des pâturages en bon état avec des formations à *S. tenacissima* (Hammouda, 2019). La végétation de leurs parcours connaissait des temps de repos. Les situations et dynamiques foncières des parcours peuvent donc induire des pratiques d'éleveurs à fort impact, encore faut-il les percevoir (Daoudi, 2021).

La régénération des steppes, une pratique pour éviter la dégradation ?

Des actions de régénération des steppes ont été entreprises depuis les années 1960, en ayant recours à des mises en défens de pâture et l'implantation de pâturage aérien (ligneux dont les feuilles fourragères ne tombent pas au sol) (Corriols, 1965 ; Gintzbuger *et al.*, 2000). Les régénérations végétales en l'absence de pâture s'avèrent satisfaisantes,

tout en restant liées aux conditions météorologiques. Cependant, les résultats obtenus après la remise à la pâture pendant plusieurs années se révèlent décevants, car les éleveurs, voyant le potentiel fourrager important, pratiquent de fortes charges sur de longues durées qui vulnérabilisent la végétation (Louhaichi *et al.*, 2019).

Dans le cadre d'un projet de recherche-action dans une commune steppique (pluviométrie de 250 mm·an^{-1}), une appréciation de l'état des pâturages a été réalisée afin d'identifier avec les agropasteurs les parcours les plus dégradés et assez dégradés. Pour les premiers, il a été procédé à des plantations de buissons fourragers (*Atriplex* spp.) avec une mise en défens de pâture pendant 3 ans. Quant aux seconds, ils ont fait l'objet d'une simple mise en défens de 3 ans. Le suivi de ces parcours a commencé en 2009 et a pris fin en 2017 (les pâtures ont repris en 2012). Il a porté sur 7 parcours plantés en *Atriplex* spp., 4 mises en défens de pâture et 3 témoins.

Les résultats (tableau 2.1) s'apprécient en tenant compte des pluviométries annuelles (en millimètre).

Tableau 2.1. Variation du recouvrement global moyen de la végétation (RGV) en % sur les différents parcours au cours du temps (Bouchareb *et al.*, 2020).

Années	2009	2010	2011	2012	2013	2015	2017
P (en mm)	390	425	337	245	277	221	202
T	35	42,2	38,6	38,41	33,4	34,11	33
MD	56	78,3	69,7	64	62,5	54,3	48
PL	27,1	58,4	57	54,8	62,8	65,3	61

P : pluviométrie annuelle.
T : parcours témoin.
MD : parcours mis en défens.
PL : parcours ayant fait l'objet de plantations d'arbustes fourragers.

Les parcours en plantations et mis en défens ont profité des premières années pluvieuses. Dès 2012, la diminution du recouvrement global moyen de la végétation (RGV) des zones mises en défens s'explique par la baisse pluviométrique et la reprise de la pâture. Ces facteurs n'affectent pas les parcours ayant fait l'objet de plantations (PL) dont le RGV est multiplié par 2,25 alors qu'initialement ces parcours étaient les plus dégradés. Les plants d'*Atriplex* amortissent les pluies (qui ruissellent moins) et leur structure en buissons qui se densifient atténue l'effet de la pâture en limitant le stationnement des animaux.

La richesse spécifique a été exprimée par l'indice de Shannon calculé pour les types de parcours et de faciès indépendamment des traitements des parcours (tableau 2.2).

L'indice se maintient à un niveau satisfaisant pour les parcours mis en défens. Le déclin est net pour les parcours ayant fait l'objet de plantations avec la croissance des plantations.



Dans le cas des plantations en *Atriplex*, la biodiversité diminue dans un premier temps, puis un retour progressif d'espèces locales s'opère, en réponse à l'amélioration des conditions écologiques stationnaires. Cela se vérifie dans les terres qui ont fait l'objet de plantations fourragères la dernière année du suivi, malgré une faible pluviométrie. Les milieux protégés, comme les parcours mis en défens et les parcours où des plantations fourragères ont été réalisées, arrivent à maintenir une diversité floristique liée en partie à l'aspect « parapluie » que génèrent les touffes, protégeant l'ensemble d'espèces accompagnatrices (Slimani et Aïdoud, 2018).

Tableau 2.2. Évolution de l'indice de Shannon sur les différents parcours au cours du temps.

Années	2009	2010	2011	2012	2013	2015	2017
P (en mm)	390	425	337	245	277	221	202
T	2,7	2,84	2,57	2,43	2,37	2,11	1,78
MD	3,21	3,13	3,03	2,72	3,24	2,81	2,92
PL	2,75	2,85	2,8	2,63	2,44	2,25	2,32

P : pluviométrie annuelle.
T : parcours témoin.
MD : parcours mis en défens.
PL : parcours ayant fait l'objet de plantations d'arbustes fourragers.

La corrélation s'avère nette entre le recouvrement et la productivité, ainsi que la pluviosité (tableau 2.3). La productivité des témoins s'élève les premières années pluvieuses sans avoir d'aptitude à se maintenir en années plus sèches. Les parcours mis en défens présentent une forte élévation de leur productivité à la troisième année après un cycle triennal pluvieux ayant permis aux espèces annuelles et pérennes de s'exprimer à leur maximum. Ce phénomène de succession d'années favorables a souvent été analysé (Slimani et Aïdoud, 2018). Les *Atriplex* présentent des traits fonctionnels différents, qui atténuent l'effet pluviométrique, autant à la hausse qu'à la baisse. Elles montrent des aptitudes à la mitigation, car même les dernières années sèches, elles restent les plus productives, alors qu'elles étaient très pâturées.

Une étude auprès des éleveurs nous a permis de noter que lors de remise à la pâture des parcours mis en défens ou de ceux en plantations fourragères, compte tenu de l'offre fourragère, les éleveurs ont augmenté leur cheptel (de 140 %). Nous avons noté aussi que les éleveurs ayant des plantations fourragères ont diminué leur surface de culture en orge. Cela n'a pas été compensé par l'achat extérieur d'orge, car ils ont réduit l'apport de concentré.

En steppe algérienne, en raison des fortes variations pluviométriques interannuelles, les éleveurs semblent avoir développé des stratégies d'exploitation intense de la ressource,

quand l'année s'y prête, en considérant que quelle que soit leur pratique concernant la végétation, les années suivantes peuvent être soumises à la sécheresse et donc à de très basses ressources pastorales. Ce constat met en exergue l'importance d'échanger avec les éleveurs, afin qu'ils puissent percevoir la végétation des parcours régénérés, notamment par des plantations fourragères, comme une ressource pouvant en partie supporter les sécheresses si ces parcours n'ont pas fait l'objet d'une pâture excessive l'année précédente. Le travail de recherche participative entrepris lors des mises en défens et de la plantation aurait dû continuer lors de l'ouverture à la pâture mais n'a pas pu être réalisé car le projet arrivait à sa fin. Il semble que pour les jeunes générations, il serait pertinent d'envisager un accompagnement. Une telle démarche nécessiterait de travailler sur les jeux d'alliances et d'accès aux parcours en mobilisant les sciences humaines et sociales.

Tableau 2.3. Productivité des parcours au cours du temps en kg·ha^{-1}·an^{-1}.

Années	2009	2010	2011	2012	2013	2015	2017
P (en mm)	390	425	337	245	277	221	202
T	250	270	300	280	265	255	205
MD	313	790	1000	485	600	400	320
PL	221	390	460	615	605	575	450

P : pluviométrie annuelle.
T : parcours témoin.
MD : parcours mis en défens.
PL : parcours ayant fait l'objet de plantations d'arbustes fourragers.



L'élevage au pâturage est un système qui repose sur l'usage de la végétation spontanée comme source principale d'alimentation du bétail. Cette végétation spontanée est influencée par les conditions pédoclimatiques et aussi par les pratiques d'élevage. L'adaptation de la végétation peut reposer à la fois sur des modifications d'une espèce (intraspécifique) et sur des modifications des communautés végétales (variation interspécifique). Ces adaptations s'observent uniquement sur le long terme et nécessitent donc des études reposant sur des données historiques multiples. La tendance lourde montre une expansion des zones de désertification de 10 % par décennie. Les réhabilitations et les cultures fourragères peuvent stabiliser cette progression moyennant un travail de co-construction tenant compte des dynamiques sociales et renouant avec les logiques de parcours collectifs régulés.



Robustesse des animaux d'élevage : des leviers physiologiques et comportementaux au service de l'adaptation

Eliel González-García, Alexandre Ickowicz, Nathalie Debus, Moutaz Alhamada, Habibou Assouma

Dans les systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux, les animaux font face à des variations parfois drastiques de la disponibilité des ressources alimentaires, par exemple au cours de sécheresses plus ou moins prévisibles et prolongées, induisant des épisodes de stress thermique, hydrique et nutritionnel. Dans de telles conditions, la production d'herbe et plus globalement de biomasse est limitée, temporairement ou sur une plus longue période. Pour survivre, les ruminants, tributaires de cette ressource, vont devoir s'adapter soit directement (adaptation physiologique individuelle), soit indirectement (avec des ajustements des pratiques de conduite). Par adaptation physiologique individuelle, nous entendons l'ensemble des régulations bénéfiques des processus physiologiques mis en œuvre par un individu soumis à des conditions nouvelles et qui lui permettent de répondre de façon plus ou moins efficace (processus dynamique). Parmi la palette d'adaptations physiologiques, un des leviers principaux est la capacité à ajuster le comportement alimentaire, à partir de la mise en place de mécanismes liés aux choix et prises alimentaires ainsi qu'à la mobilité spatiale. Dans des conditions de pénuries extrêmes, pour compenser les bilans énergétiques négatifs conséquents, un autre mécanisme physiologique de compensation sur lequel s'appuient les ruminants est la dynamique de mobilisation et reconstitution des réserves corporelles. Au-delà de la condition corporelle, d'autres traits tels que les performances de reproduction des animaux sont affectés négativement par de tels événements d'insuffisance alimentaire et nutritionnelle. Les femelles sous-alimentées adaptent leurs comportements en modifiant la nature et la fréquence des chaleurs et des accouplements. Le comportement reproducteur des mâles est affecté de manière indirecte via l'attractivité des femelles. La compréhension de la cascade complexe de tels mécanismes physiologiques (isolés ou combinés), à l'échelle des individus et des troupeaux, fait partie intégrante des efforts pour bien les mettre en valeur dans une stratégie d'adaptation de ces systèmes d'élevage à différents niveaux d'organisation.

Le comportement alimentaire des ruminants au pâturage comme stratégie d'adaptation

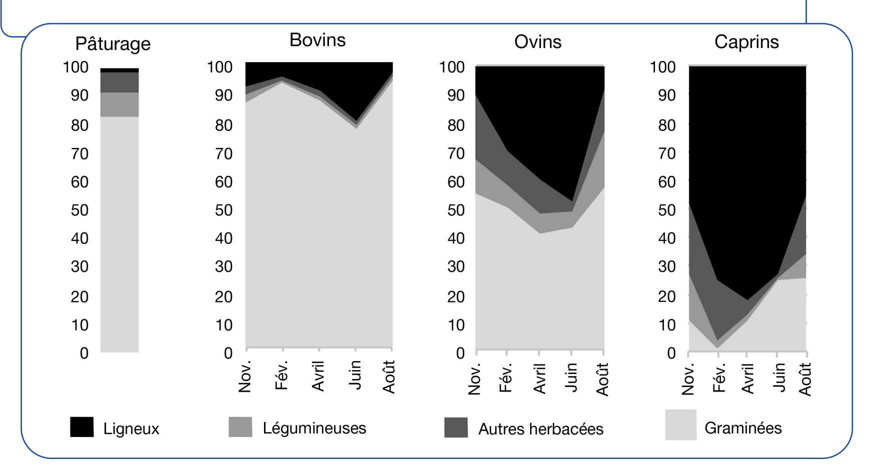
Dans les systèmes d'élevage au pâturage, la variabilité spatiale et temporelle des conditions climatiques (température et pluviosité pour l'essentiel) se traduit par une répartition variable des ressources alimentaires pour les ruminants (quantité et qualité des biomasses végétales herbacées et ligneuses). Un des premiers leviers d'adaptation de ces systèmes d'élevage est donc la capacité d'ajustement de leur comportement alimentaire. Celui-ci s'appuie sur trois leviers essentiels : le choix alimentaire, la prise alimentaire et la mobilité.



Comportement sélectif des ruminants au pâturage

Le comportement sélectif des ruminants est difficile à décrire avec précision alors que ces animaux sont en libre pâture, mobiles et parfois difficiles à approcher (Guérin *et al.*, 1988 ; Bonnet *et al.*, 2015). Les études montrent qu'il varie en fonction de l'espèce de ruminant (Guérin *et al.*, 1988 ; Ickowicz, 1995) avec des proportions spécifiques de contribution des différentes classes de végétation à la ration journalière (figure 2.3).

Figure 2.3. Comportement sélectif d'ingestion des trois espèces de ruminants domestiques (bovins, ovins, caprins) sur un même pâturage au Sahel selon la saison (en % de la composition botanique) (d'après Guérin *et al.*, 1988 ; Ickowicz, 1995).



On notera que pendant les saisons sèches ou dans des conditions de faible disponibilité des fourrages herbacés, les ligneux, sous forme de feuilles ou de fruits, peuvent parfois contribuer encore davantage au régime, jusqu'à 50 % de la biomasse ingérée par les bovins par exemple, notamment en saison sèche (Ickowicz et Mbaye, 2001 ; Assouma *et al.*, 2018). Ces différences de comportement sélectif d'ingestion des ruminants montrent une complémentarité entre les espèces qui exercent des pressions de pâture distinctes sur les compartiments de la végétation et induisent à pression de pâture modérée des interactions positives pour la production. Ces différences plaident en faveur d'une composition mixte des troupeaux, pratique régulière dans les zones arides méditerranéennes et tropicales (Guérin *et al.*, 1988). Ainsi le comportement spécifique et plastique des ruminants sur parcours est un levier important d'adaptation à la variabilité spatiale et temporelle des ressources à l'échelle intra- et interannuelle mais aussi sur le plus long terme, pour une gestion durable des ressources. Ces mécanismes offrent l'opportunité à l'éleveur de jouer sur la composition spécifique de son troupeau pour réagir à des changements plus



tendanciels du climat et de l'environnement tout en maintenant le niveau de productivité de son élevage en exploitant l'ensemble des compartiments végétaux.

Adaptation de la capacité d'ingestion des ruminants

La capacité d'ingestion sur parcours (exprimée en grammes de matière sèche végétale ingérée par seconde, g MS/s) détermine en partie les performances animales et est fonction principalement de l'espèce animale et de son format (gabarit, taille de la bouchée ou du coup de dent), mais aussi du couvert végétal (Hodgson et Illius, 1996 ; figure 2.4), et sera inversement proportionnelle à la vitesse de déplacement de l'animal sur le parcours.

Ainsi, une étude récente en milieu tropical (Chirat *et al.*, 2014) précise le modèle liant la capacité d'ingestion à la biomasse fourragère disponible sur parcours (figure 2.5). Nous notons ici qu'en deçà d'une disponibilité de 1 tMS/ha, l'animal n'arrive plus à compenser la raréfaction des ressources par une accélération des prises alimentaires qui épuise l'animal. À l'inverse, avec des offres au-delà de 3 tMS/ha, on note une réduction de la vitesse d'ingestion liée à une structure de végétation trop dense et touffue et souvent peu appétée. Ces interactions réduisent drastiquement la capacité d'ingestion journalière notamment en saison sèche (figure 2.6 ; Assouma *et al.*, 2018). S'adapter à cette dynamique peut impliquer l'intervention de l'éleveur (ou du berger) pour par exemple changer l'animal de pâturage en lui proposant une meilleure densité ou qualité de fourrage afin d'éviter une baisse des performances (Chirat *et al.*, 2014 ; Meuret, 2010).

Figure 2.4. Effet de la biomasse disponible (hauteur de l'herbe en cm) sur (A) le poids des bouchées (en mg) et sur (B) le rythme d'ingestion (en bouchées/min) et (C) la résultante sur l'ingestion quotidienne de matière organique (kg MO ingérée/jour) (adapté de Hodgson et Illius, 1996).

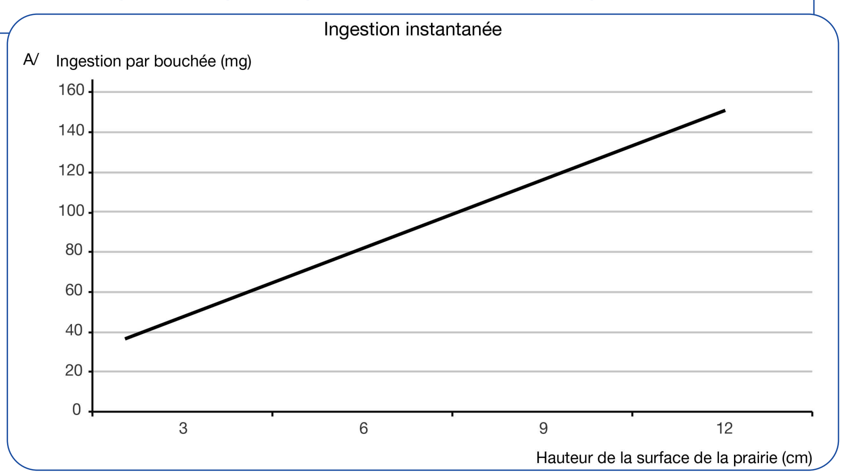


Figure 2.4. Suite

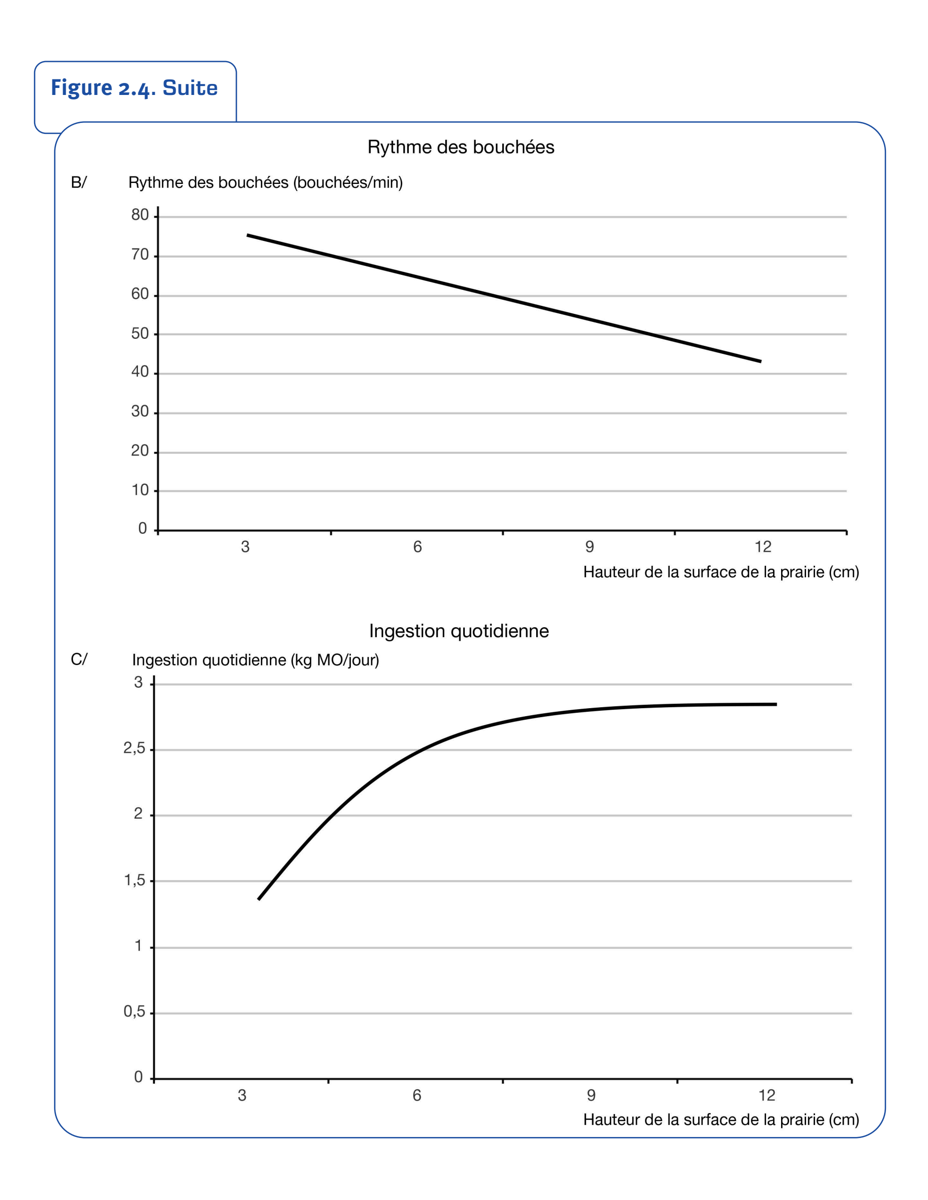


Figure 2.5. Adaptation de la capacité d'ingestion des ruminants sur parcours tropicaux (en g MS/min) en fonction de la biomasse végétale disponible (en kg MS/ha). (A) : données observées de base et courbe d'ingestion résultante. (B) : représentation des moyennes, écarts-types et valeurs extrêmes observés pour chaque classe de biomasse. Tiré de Chirat *et al.*, 2014.

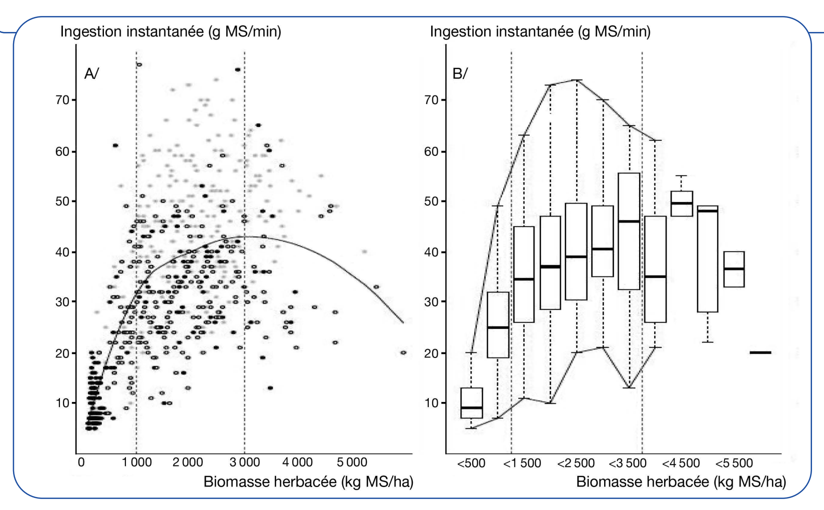
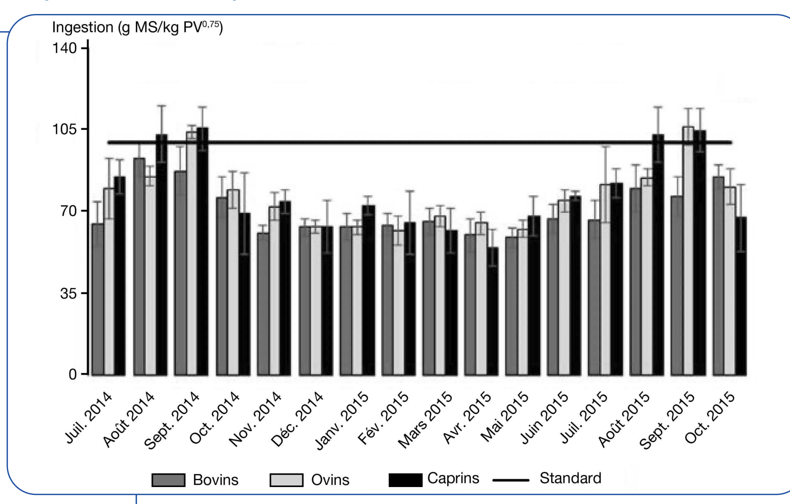


Figure 2.6. Variations de l'ingestion quotidienne des trois espèces de ruminants (bovins, ovins et caprins) (en g MS/kg de poids métabolique) sur parcours en zone pastorale sahélienne (Assouma *et al.*, 2018).



$PV^{0,75}$: poids métabolique.
Forte réduction en saison sèche lorsque la disponibilité de la biomasse végétale est trop réduite.

Rôle de la mobilité et du berger

Le comportement d'ingestion décrit ci-dessus au niveau de la station de végétation peut être significativement modifié par la mobilité des animaux, avec ou sans intervention d'un berger. L'accélération des prises alimentaires à laquelle l'animal a recours pour compenser la raréfaction des fourrages peut s'accompagner d'une augmentation de l'aire de prospection des pâturages. Les distances parcourues induisent une augmentation de l'énergie dépensée pour s'alimenter, ce qui peut contribuer à une baisse de performance. Toutefois, pour les races adaptées, l'augmentation des marches quotidiennes (dans la limite des distances reportées) n'accentue pas significativement la perte de poids due au manque de ressources fourragères, mais accroît les besoins en eau dans des contextes où la rareté des points d'eau peut amener les animaux à s'abreuver tous les deux jours. L'intervention avisée de l'éleveur dans ces situations est d'autant plus essentielle qu'il connaît l'espace et les potentielles compétitions avec les autres troupeaux. Pour ces deux paramètres, choix et capacité d'ingestion, l'action de l'éleveur ou du berger qui accompagne le troupeau sur les parcours peut être décisive pour faciliter l'organisation dans le temps et l'espace des prises alimentaires et l'apprentissage des ruminants sur de nouveaux pâturages (Meuret, 2010).

Les réserves corporelles comme caractère d'intérêt dans des conditions contraignantes

La dynamique de mobilisation-reconstitution des réserves corporelles (RC) est un mécanisme essentiel pour compenser tout ou partie du déficit alimentaire et énergétique subi dans des conditions d'élevage contraignantes. Il s'agit notamment des RC énergétiques stockées sous la forme de lipides (tissu adipeux) dans des régions sous-cutanées ou associées aux organes internes. Les RC constituent un atout essentiel surtout pour les femelles qui ont l'habitude de les mobiliser en fin de gestation et en début de lactation pour soutenir des niveaux de production laitière induisant des bilans énergétiques négatifs alors que leur capacité d'ingestion n'est pas à son maximum. Ces RC sont également mobilisées lorsque les animaux doivent compenser les déficits énergétiques résultant de la ressource pâturée variable en quantité et en qualité dans le temps, comme cela a été décrit précédemment.

C'est ce compartiment et ses processus de mobilisation-reconstitution qui sont étudiés dans des situations précises observées ou provoquées en utilisant la brebis reproductrice comme modèle. L'objectif est d'identifier et de comprendre les déterminants favorisant les fonctions relatives à la survie de l'individu dans des périodes courtes ou plus longues après les perturbations subies dans des conditions de sous-alimentation dans des milieux méditerranéens et tropicaux. Il s'agit de travailler à des échelles individuelle et collective (le troupeau), en passant par l'étude de groupes fonctionnels (par exemple en fonction des stades physiologiques) et tout au long de la carrière. Le phénotypage des individus, dans une perspective dynamique, est mis en cohérence avec une prise en compte fine des interactions génotype × milieu, dans le temps et dans l'espace, et

d'une approche hiérarchisée des processus d'adaptation. Enfin, cette démarche permet de concevoir des stratégies de conduites d'alimentation alternatives tout en procédant à une amélioration génétique des capacités individuelles identifiées comme avantageuses.

En combinaison avec le suivi du poids vif (PV) et la note d'état corporel (NEC), nous utilisons un set de métabolites et d'hormones plasmatiques pour caractériser les états métaboliques intervenant dans les mécanismes adaptatifs à des bilans énergétiques négatifs. Des études de la robustesse des brebis ont été conduites dans des conditions contrastées au domaine expérimental INRAE de La Fage (Causse du Larzac, 800 m d'altitude).

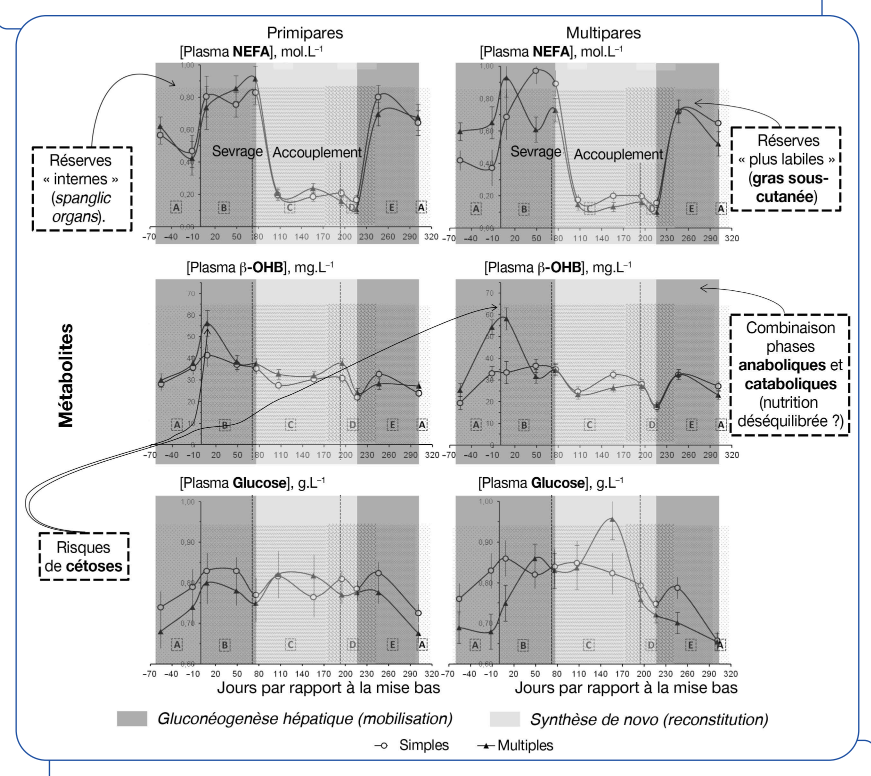
Par exemple, nous avons suivi sur plusieurs semaines un lot de brebis laitières en lactation de race Lacaune avec des bilans énergétiques différents en fonction du rythme de traite (classique ou monotraite) alors que l'ingestion volontaire (offre à volonté avec ingrédients et rationnement identique) restait inchangée (González-García *et al.*, 2015 ; Hassoun *et al.*, 2016). Nous avons également suivi des brebis allaitantes de la race Romane sur parcours pendant plusieurs mois (González-García *et al.*, 2014). Pour chaque protocole, nous suivions la trajectoire de paramètres biologiques quantifiables au cours d'une année physiologique complète tels que le PV, la NEC et la concentration en métabolites et hormones plasmatiques liés aux processus de mobilisation-reconstitution des RC. La multiplicité des indicateurs choisis permet d'appréhender la diversité et la complexité des mécanismes et des composantes biologiques inhérente à l'adaptation au bilan énergétique négatif.

Notre démarche consiste à soumettre les différents génotypes à des situations, au-delà des normes habituellement associées à la progression classique des stades physiologiques successifs. Dans le cas des brebis laitières, l'expérience a consisté à modifier la fréquence des traites (monotraite *vs* bitraite) de manière à affecter la demande d'énergie (« effet *pull* ») liée à la production de lait. Pour les brebis Romane, la contrainte énergétique reposait sur la combinaison de la taille de la portée (plus de demande énergétique chez les brebis avec des portées multiples en comparaison avec celles ayant des portées simples) avec l'âge de la femelle (priorité ou pas à la croissance chez les primipares ou multipares). Ces contraintes ont été associées à une alimentation spécifique, représentative des variations saisonnières des fourrages sur parcours et des régimes d'alimentation successifs. Les concentrations de métabolites et hormones reflètent alors dans ces conditions les dynamiques en matière de flux d'énergie métabolique (figure 2.7).

Des effets clairs de la parité, de la taille de la portée, du passage par une séquence d'états physiologiques sur les profils métaboliques et en fonction de la fréquence de traite en race Lacaune et des changements dans la disponibilité de biomasse sur le parcours chez la brebis Romane ont été démontrés. La combinaison des facteurs expérimentaux pris en compte révèle des différences dues à l'âge de la brebis (liées à la parité) et dans la répartition de nutriments en fonction de la priorité biologique à un instant donné (*trade-offs* ou compromis). Ainsi, les changements observés pendant la période après sevrage sont tout à fait marginaux quand on les compare aux réajustements autour de la mise-bas et jusqu'au sevrage pour compenser le bilan énergétique négatif durant cette période.



Figure 2.7. Dynamique des réserves corporelles des brebis (jeunes ou adultes, avec un ou plusieurs agneaux) de la race Romane, élevées en plein air intégral sur le parcours de La Fage au cours d'une année de production.



Le graphique montre deux phases distinctes de mobilisation (autour de la mise-bas et pendant la gestation, à partir du premier mois) et de reconstitution des réserves corporelles (à partir du sevrage et jusqu'au début de la gestation). Le phénotypage du profil métabolique des acides gras non estérifiés (NEFA), corps cétoniques (β-OHB) et glucose plasmatiques permet de rendre compte du bilan énergétique des femelles.
Les lettres majuscules dans les carrés représentent le régime de l'alimentation de l'exploitation : A, alimentation conserve (ensilage et foins) pendant la fin de gestation jusqu'à la mise bas ; B, pâturage parcs fertilisés et parcours natif pendant la phase d'allaitement au printemps ; C, pâturage parcs natif pendant le tarissement en été ; D, pâturage parcs natif sur le parcours pendant le tarissement en automne ; E, pâturage prairies cultivées (en repousse) pendant le début et milieu de gestation.

Au-delà de la compréhension des mécanismes et des processus dynamiques implicites mobilisés lors de bilan énergétique négatif, l'ensemble des paramètres évalués nous permet de détecter des périodes sensibles et critiques au cours d'un cycle productif annuel pour les deux races en question dans leurs conditions d'élevage. Nous avons ainsi identifié des états physiologiques critiques généralement sous-estimés pendant

le début et le milieu de la gestation, périodes durant lesquelles la gestion nutritionnelle pourrait être améliorée. Nous avons montré l'applicabilité d'études à long terme autour de l'efficience dans les processus de mobilisation et de reconstitution des RC chez les ruminants. Il s'agit là d'une composante ayant un impact direct sur la résilience globale des élevages dans des conditions où la fluctuation en quantité et qualité d'aliments est une des contraintes principales. Une caractérisation similaire de la dynamique des RC a été effectuée avec des brebis Mérinos d'Arles soumises à différents bilans énergétiques (González-García *et al.*, 2020a).

Pour comprendre la relation entre le taux de croissance de la femelle et l'âge à la première lutte (précoce, 7 mois *vs* tardive, 19 mois), une étude avec des données historiques de 1 359 femelles du troupeau Romane de La Fage nées entre 2002 et 2012 a mis en évidence les effets d'une telle décision (mise à la reproduction précoce ou tardive) sur la vie productive ultérieure de la femelle et sur le comportement de sa descendance (González-García et Hazard, 2016).

L'adaptation du comportement reproducteur des ovins en réponse aux contraintes alimentaires

En utilisant les ovins en contexte méditerranéen comme animal modèle, nous nous sommes intéressés à l'adaptation comportementale, aussi bien de la femelle que du mâle, pour assurer la réussite de la reproduction, en situation de contrainte alimentaire.

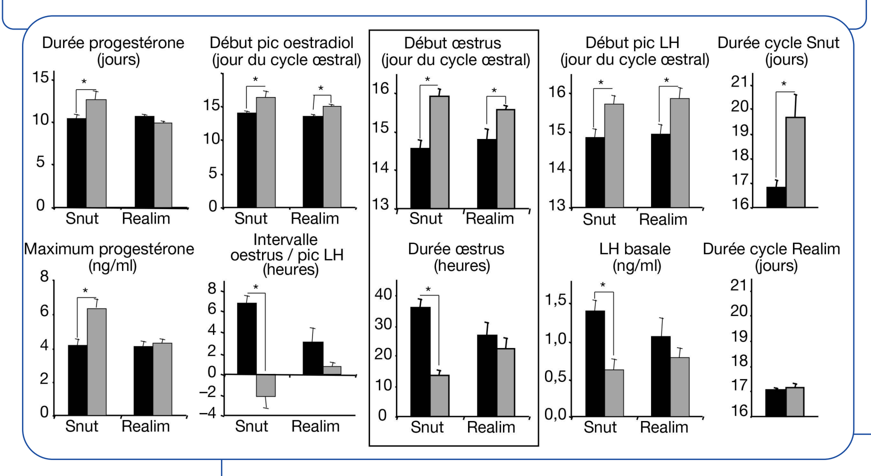
Nous avons évalué l'effet statique et dynamique de la nutrition sur le comportement sexuel et sur les hormones du cycle œstral de brebis Mérinos d'Arles. Nous avons montré (Debus *et al.*, 2005 ; Blanc *et al.*, 2004) qu'une restriction alimentaire de 50 jours (40 % *vs* 100 % des besoins d'entretien en énergie) : 1) retarde le moment d'apparition de l'œstrus de 1,5 jour et réduit de presque 3 fois la durée de l'œstrus, 2) augmente les taux plasmatiques de progestérone et retarde leur retour à un niveau basal, 3) retarde l'apparition du pic d'œstradiol, 4) diminue les niveaux de base de l'hormone lutéinisante (LH pour *luteinizing hormone*) et retarde l'apparition de son pic préovulatoire, 5) réduit fortement l'intervalle entre le début de l'œstrus et le début du pic préovulatoire de LH, 6) allonge la durée du cycle œstral de 3 jours (figure 2.8). En revanche, toutes les brebis ont ovulé et présenté des variations cycliques des taux de progestérone. Les sécrétions de l'hormone folliculostimulante (FSH pour *follicle stimulating hormone*) et le taux d'ovulation n'ont pas non plus été affectés par la restriction alimentaire. Suite à cette période de restriction, une réalimentation de 17 jours est suffisante pour restaurer des paramètres similaires à ceux des animaux témoins.

Concernant les mâles, nous avons observé les comportements de 6 béliers vis-à-vis de 36 brebis Mérinos d'Arles (12 brebis par lot) ayant reçu des régimes alimentaires contrastés pendant 3 mois couvrant entre 68 et 180 % des besoins d'entretien. Nous avons mesuré l'attractivité des brebis pour chaque mâle. Après 3 mois, nous avons observé que l'attractivité des brebis était positivement reliée aux variations de leur poids vif (figure 2.9).



Les béliers perçoivent bien l'état nutritionnel des brebis et préfèrent les brebis en bon état corporel aux brebis maigres. Ils sont de plus capables de discriminer les brebis au sein d'un troupeau en fonction de leur poids (Alhamada *et al.*, 2017b).

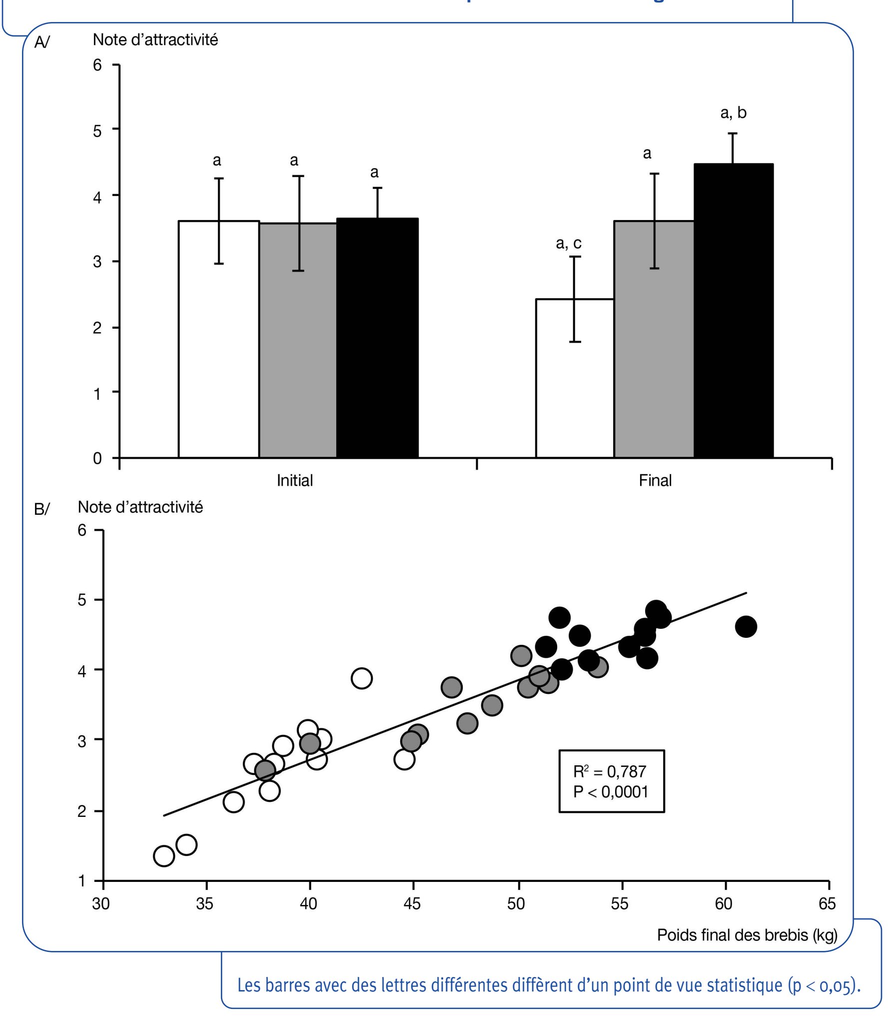
Figure 2.8. Valeurs moyennes ± erreur standard de la moyenne (n = 9) de 9 paramètres endocriniens ou comportementaux de la reproduction chez des brebis restreintes (barres grises) ou bien alimentées (barres noires).



Snut: phase de restriction alimentaire 100 % ou 40 % des besoins d'entretien en énergie.
Realim : phase de réalimentation.
Les différences statistiquement significatives (Test U de Mann-Whitney) entre les lots sont indiquées par un astérisque ($p < 0,05$).

Nous montrons, pour la première fois, l'origine comportementale de la subfertilité observée chez les brebis sous-nourries : les béliers ne cherchent pas en priorité les brebis maigres qui sont réceptives pendant un temps plus court que les brebis en bon état. Les brebis sous-alimentées qui ont des réserves corporelles insuffisantes ont donc moins de chance d'être saillies. Cela leur permet de reconstituer leurs réserves corporelles et de privilégier leur survie plutôt que de mener à bien une gestation difficile. Cette subfertilité peut être rapidement levée par une réalimentation des animaux. Notre travail montre que les brebis s'adaptent d'un point de vue individuel lors d'aléa nutritionnel afin de préserver leur intégrité et qu'au niveau du troupeau les interactions mâle × femelle permettent de favoriser les femelles les plus à même de produire. Sur le plan pratique, ces résultats indiquent qu'il est nécessaire d'adopter une conduite de la mise à la reproduction différente (ratio mâles/femelles, conduite en lots, *flushing*…) selon l'état nutritionnel des animaux.

Figure 2.9. (A) : scores moyens d'attractivité des brebis (barres blanches : lot avec 68 % des besoins d'entretien ; barres grises : lot avec 113 % des besoins ; barres noires : lot avec 180 % des besoins) avant et après 3 mois de mise en régime différencié. (B) : prédiction du score d'attractivité des brebis Mérinos d'Arles en fonction de leur poids vif. Note d'attractivité mesurée avec le dispositif Ovimate (figure 4.4).



Les barres avec des lettres différentes diffèrent d'un point de vue statistique ($p < 0,05$).

Diversité génétique et adaptation des races locales à leur milieu d'élevage

Laurence Flori, Anne Lauvie, Eliel González-García, Jessica Magnier, Lola Perucho

L'utilisation de la diversité génétique animale constitue un des principaux leviers à considérer pour améliorer l'adaptation des systèmes d'élevage aux grands changements actuels. Chez les ruminants domestiques, on observe une grande diversité intraspécifique, comme en témoignent par exemple le nombre élevé de races bovines recensées (plus de 800) et classées en zébus (*Bos taurus indicus*), taurins (*Bos taurus taurus*) et métisses zébus × taurins ou encore les plus de 1500 races ovines inventoriées dans le monde[4]. Les principaux facteurs ayant contribué à générer cette diversité sont la domestication, les migrations parfois lointaines des ruminants depuis leurs foyers de domestication et les différentes pressions de sélection naturelle (telles que l'exposition à de nouvelles conditions climatiques et à de nouveaux agents pathogènes et l'abondance ou la pénurie des ressources alimentaires et hydriques) et artificielle (sélection des animaux par les éleveurs sur des critères morphologiques, de coloration de robe, de docilité ou sur leurs performances, en particulier) récentes. Les races locales rustiques et patrimoniales, principalement considérées dans les élevages de ruminants au pâturage, résultent ainsi d'un processus évolutif qui a déterminé leur aptitude à vivre dans un environnement précis.

Afin de conserver et d'utiliser au mieux cette diversité génétique au sein de systèmes d'élevage durables, il apparaît essentiel de bien la caractériser (à l'échelle de la population ou au sein du troupeau par exemple en lien avec des caractères d'intérêt comme l'efficacité alimentaire ou la dynamique de mobilisation-reconstitution des réserves corporelles), d'appréhender l'histoire démographique de ces races et d'identifier les mécanismes génétiques qui sous-tendent leurs capacités adaptatives. Il est également nécessaire de mieux caractériser les perceptions qu'ont les éleveurs de l'adaptation de leurs races, de leurs troupeaux et de leurs animaux et de mieux comprendre comment ils prennent en compte cette adaptation et la gèrent grâce à leurs pratiques.

Caractérisation génétique des races locales adaptées aux conditions tropicales et méditerranéennes

Ces vingt dernières années, la révolution génomique et le développement des nouveaux outils de génotypage à haut débit[5] et de séquençage qui l'ont accompagnée ont grandement facilité la caractérisation génétique fine des races de ruminants. Ces outils ont par exemple permis d'obtenir des données de génotypage pour de nombreuses races bovines et ovines pouvant servir de références, stockées dans la base de données Widde[6] (Sempéré *et al.*, 2015).

4. www.fao.org/dad-is/fr/.
5. Qui permettent d'étudier simultanément plusieurs milliers à plusieurs centaines de milliers de marqueurs bialléliques répartis sur l'ensemble du génome.
6. http://widde.toulouse.inra.fr/widde/.



L'exploration de la structuration de la diversité génétique des races locales (par le biais d'approches multidimensionnelles ou de classifications hiérarchiques supervisées et non supervisées) appliquée à des données de génotypage individuel constitue une étape essentielle dans la description de ces races et un prérequis à l'étude plus poussée de leurs histoires démographique et adaptative. Chez les bovins, par exemple, cette approche exploratoire a permis de mieux caractériser la structure de la diversité génétique de certaines races locales en les comparant à un panel de races représentatives de la diversité génétique de l'espèce et de suggérer des hypothèses historiques sur leur origine, comme en attestent les exemples du Zébu mahorais (de Mayotte) et des races bovines méditerranéennes (Ouvrard *et al.*, 2019 ; Flori *et al.*, 2019).

L'étude génétique du Zébu mahorais[7] a en effet confirmé son originalité et initié la mise en place de mesures de conservation. Cette population locale (environ 70 % des 20 000 têtes recensées à Mayotte), dont la présence sur l'île pourrait remonter à plusieurs siècles d'après les données archéozoologiques (Boivin, 2013) est utilisée dans des systèmes de production traditionnels locaux (élevages familiaux de quelques têtes) et présente une forte valeur cérémonielle et culturelle. Certains éleveurs ont cependant commencé depuis une vingtaine d'années à effectuer des croisements avec des races taurines européennes améliorées (races Montbéliarde, Jersiaise, Gasconne et Brune), menaçant à terme le Zébu mahorais. Une démarche de reconnaissance de cette race locale a donc été entreprise par la constitution d'un dossier intégrant une caractérisation phénotypique et génétique conjointe et a ainsi conduit à sa reconnaissance officielle en 2018 (Ouvrard *et al.*, 2019). L'étude phénotypique de cette race, qui est un préalable au choix des animaux à caractériser génétiquement, a permis d'observer une grande hétérogénéité des patrons de robe et de certains paramètres morphologiques chez les 400 animaux étudiés et d'établir une description type utile pour définir le standard de la race (figure 2.10).

La caractérisation génétique de 150 de ces animaux, non apparentés, basée sur le génotypage de 50 000 marqueurs bialléliques répartis sur leur génome, a en revanche révélé une grande homogénéité génétique et une proximité avec les zébus de Madagascar (Ouvrard *et al.*, 2019), ces deux races présentant une plus forte ascendance indicine[8] que les races bovines du continent africain et une faible ascendance taurine africaine. Chez 16 % des individus, une faible ascendance taurine européenne (< 5 %), résultant probablement des croisements récents avec des races taurines européennes, est également observée. Il s'agit maintenant d'étendre l'inventaire de la population, d'en organiser la gestion en mettant en place un schéma de conservation et de valorisation. Ces premières études génétiques seront également poursuivies par l'estimation de certains paramètres démographiques et l'étude des capacités de production

7. Conduite grâce à une collaboration entre la coopérative des éleveurs Coopadem et le Cirad, aidés par des généticiens d'INRAE dans le cadre du projet Rita (réseau d'innovation et de transfert agricole) Defi-Animal, coordonné par Emmanuel Tillard (Selmet, La Réunion).
8. De *Bos indicus*.

Figure 2.10. Exemple de paramètres mesurés chez 400 Zébus mahorais de 178 élevages différents sélectionnés sur l'ensemble du territoire de Mayotte.

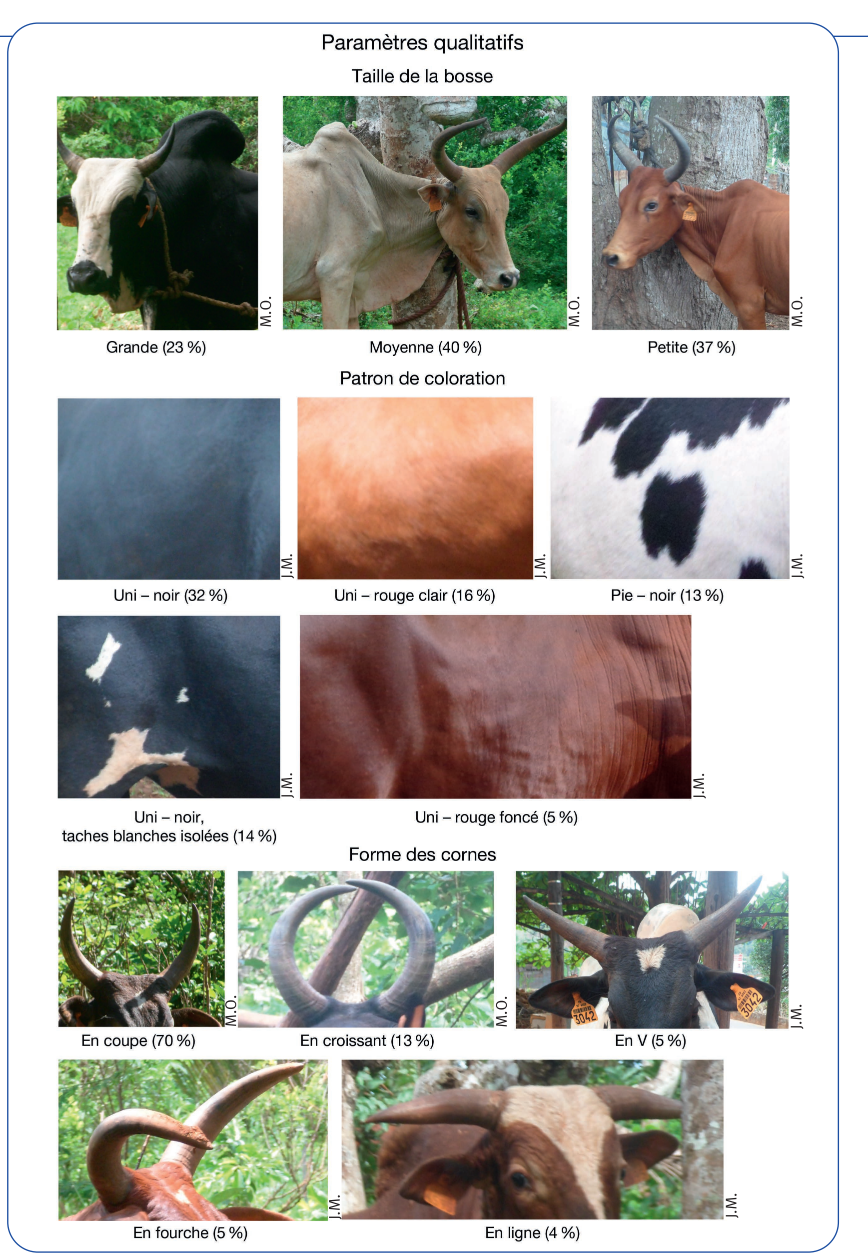
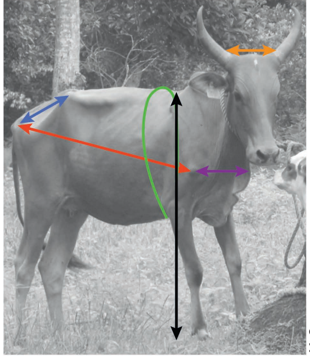


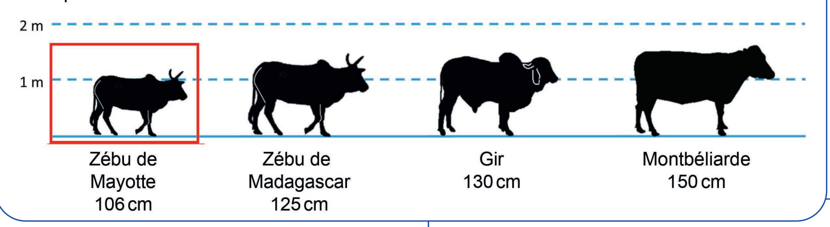
Figure 2.10. Suite.

Paramètres quantitatifs



Paramètres mesurés	Moyenne en cm (écart-type)
Hauteur au garrot	106 (7)
Taille oblique du corps	118 (9)
Tour de poitrine	139 (10)
Largeur de poitrine	34 (5)
Longueur de la hanche	39 (3)
Longueur entre les cornes	15 (2)

Comparaison de taille avec d'autres races



Sources : M.O., Mélissa Ouvrard ; J.M., Jessica Magnier.

et d'adaptation de cette race, qui restent encore mal connues. La population de Zébus mahorais a en effet développé des capacités d'adaptation propres à l'environnement contraint de l'île (climat chaud et humide, pression sanitaire, faible disponibilité des ressources hydriques et alimentaires).

Cette approche exploratoire a également été appliquée à plus large échelle pour étudier la structuration de la diversité génétique de 21 races bovines méditerranéennes locales (640 individus génotypés pour plus de 50 000 marqueurs bialléliques) originaires d'Algérie (Cheurfa, Chélifienne, Guelmoise), de Chypre (Cyprus), d'Égypte (Baladi), de Grèce (Brachykeratiki), d'Italie (Maremmana, Romagnola, Sarda, Sardo-modicana, Cinesara, Modicana), du Maroc (Oulmes Zaër, Tidili, Brune de l'Atlas), d'Espagne (Mallorquina, Menorquina, Marismena, Negra andaluza) et de France (Raço di Biou et Corse) (Flori *et al.*, 2019[9]). Le bassin méditerranéen ayant été traversé par plusieurs routes de migrations empruntées par les populations d'éleveurs, l'histoire démographique de ces races apparaît relativement complexe. L'étude génétique montre que les races étudiées ont pour leur majorité des ascendances taurines européennes et africaines dont les proportions dépendent de la latitude. Cependant une certaine proportion d'ascendance indicine est également détectée chez les races égyptienne, grecque et chypriote et dans une moindre mesure chez les races italiennes Maremmana, Modicana et Sarda-modicana et chez la race Corse, témoignant d'un métissage avec des populations d'ascendance indicine en Europe du Sud dont le niveau décroît d'est en ouest. Ce patron d'ascendance est concordant avec l'histoire migratoire connue des éleveurs du néolithique depuis le centre de domestication des taurins dans le croissant fertile vers l'ouest via la Méditerranée et ses îles principales en suivant la route dite « méditerranéenne », il y a 6 000 à 6 500 ans. Il est également en accord avec la migration des taurins de l'Afrique du Nord vers l'Espagne après leur introduction en Afrique par l'Égypte, il y a 6 500 ans. L'entrecroisement en Égypte, à peu près à la même époque, de plusieurs routes de migrations empruntées par les communautés sédentaires à travers l'Europe et l'Afrique a pu parallèlement favoriser le métissage de différentes populations bovines. Des populations d'ascendance indicine ou métissées avec des zébus ont probablement été importées en Europe du Sud (entre 200 ans avant J.-C. et 1720) par la route de la soie qui connectait l'Asie à la mer Méditerranée, en s'arrêtant en Italie, en accord avec le gradient décroissant d'ascendance indicine observé de la Sicile à l'Italie continentale et à la Corse. La faible ascendance indicine détectée également chez certaines races algériennes (Cheurfa et Guelmoise) résulte probablement d'un métissage résiduel entre taurins et zébus africains alors que l'ascendance taurine européenne détectée dans les autres races nord-africaines fait état d'un métissage plus récent, durant le siècle dernier, avec des taurins européens. L'ensemble de ces scénarios plus ou moins complexes suggérés par ces approches exploratoires de la structuration génétique de ces populations devront cependant être confirmés par une modélisation plus fine des processus démographiques.

9. Projet Galimed (Inra, Métaprogramme Accaf), coordonné par Denis Laloë (Gabi, Jouy-en-Josas).

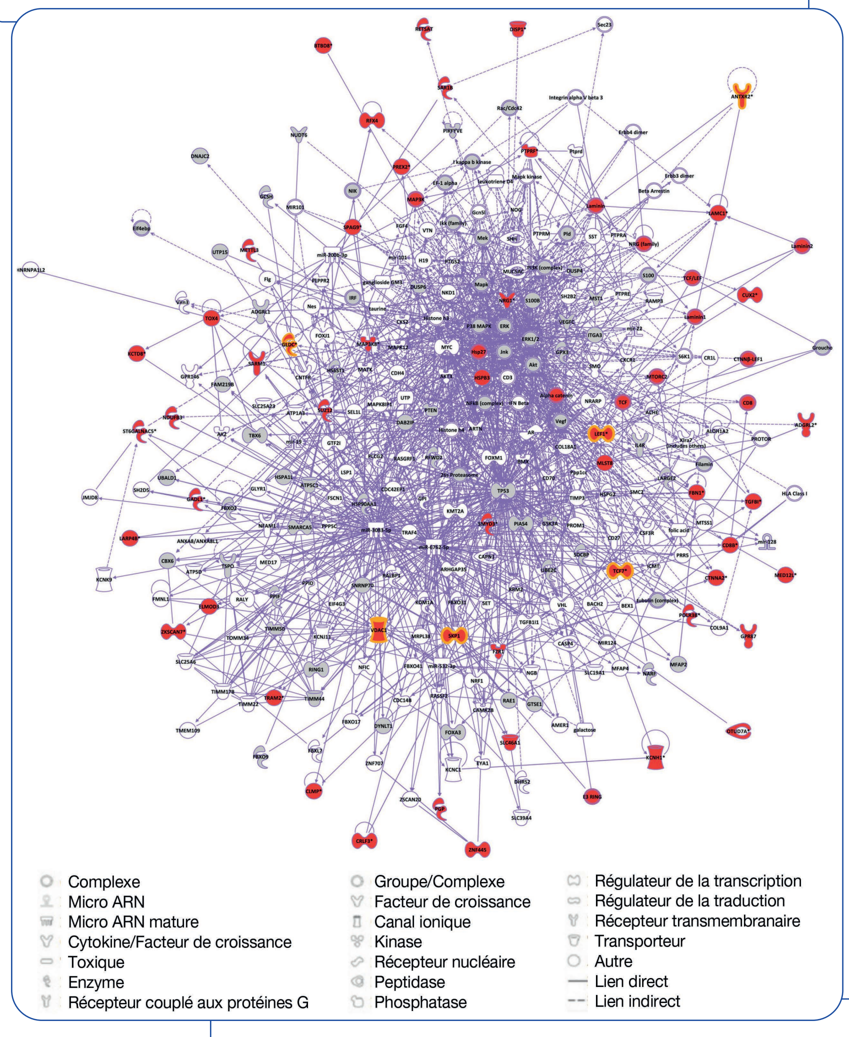


Étude génétique de l'histoire adaptative des races locales méditerranéennes

L'identification des gènes impliqués dans l'adaptation des races locales à leur environnement spécifique, couplée à la dissection des mécanismes moléculaires sous-jacents, permet de mieux comprendre les mécanismes adaptatifs. Elle peut également être considérée comme un moyen supplémentaire pour caractériser les races locales et montrer leur originalité d'un point de vue génétique. Elle passe par la localisation de traces (ou signatures) de sélections naturelle et artificielle dans le génome en analysant l'information génétique dense de plusieurs dizaines d'individus. L'annotation fonctionnelle des gènes candidats identifiés dans les régions sous sélection à l'aide d'outils de la biologie des systèmes (Flori *et al.*, 2012 ; 2014 ; 2019) permet d'émettre des hypothèses sur les principales fonctions, voies biologiques et réseaux de gènes dans lesquels les gènes sous sélection sont impliqués et sur les pressions de sélection qui ont pu s'exercer. L'utilisation complémentaire de méthodes d'association avec des phénotypes ou des variables environnementales définis à l'échelle des populations (Gautier, 2015) peut permettre d'établir un lien entre les signatures génomiques de sélection et ces variables et ainsi de confirmer certaines de ces hypothèses.

Les 21 races méditerranéennes précédemment étudiées ont été soumises pendant des siècles aux différentes variantes du climat méditerranéen. La réalisation conjointe d'un criblage des signatures de sélection dans leur génome et des régions chromosomiques associées avec des variables populationnelles discriminant les différents sous-types du climat méditerranéen a permis d'établir un lien direct entre certaines signatures de sélection et des variables climatiques et de proposer une carte génétique de l'association avec le climat (Flori *et al.*, 2019). Neuf régions sous sélection et 17 gènes candidats situés sur cinq chromosomes différents ont ainsi été identifiés, parmi lesquels plusieurs gènes candidats (LEF1, ANTXR2, VDAC1, TCF7 et SKP1) sont également associés à des variables climatiques. Les 55 gènes associés avec au moins une variable climatique (figure 2.11) sont impliqués dans plusieurs fonctions biologiques jouant un rôle dans l'adaptation au climat méditerranéen telles que la thermotolérance, la protection contre les ultraviolets (UV), la résistance aux agents pathogènes ou le métabolisme. Les principales pressions de sélection affectant les bovins de la zone méditerranéenne sont vraisemblablement les variations de l'exposition à la chaleur et aux UV, la disponibilité des ressources alimentaires et hydriques et l'exposition à des agents pathogènes. Parmi les gènes candidats forts associés au climat (par exemple NDUFB3, FBN1, METTL3, LEF1, ANTXR2 et TCF7), le gène ANTXR2, déjà trouvé sous sélection chez les races bovines ouest-africaines et associé à des variables climatiques chez l'homme et chez les moutons, code en effet pour le récepteur de la toxine de *Bacillus anthracis*, l'agent du charbon bactéridien. Ces résultats suggèrent que le charbon bactéridien, la plus ancienne zoonose connue avec une distribution mondiale, a dû exercer une forte pression de sélection sur les races bovines du bassin méditerranéen et de l'Afrique de l'Ouest et illustre un lien clair entre cette maladie et le climat. Les spores de *Bacillus anthracis* peuvent en effet persister dans le sol pendant des années et les facteurs climatiques tels que la température et les précipitations sont déterminants dans l'apparition des épizooties qu'elles provoquent.

Figure 2.11. Réseau de gènes comprenant les gènes sous sélection et ceux associés aux variables climatiques chez 21 races méditerranéennes (Flori *et al.*, 2019).



Le réseau a été obtenu en utilisant le logiciel *Ingenuity Pathway Analysis*. Les gènes sous sélection sont surlignés en jaune, ceux associés avec au moins une variable climatique sont colorés en rouge. Les gènes grisés ne sont associés à aucune variable climatique. La forme des molécules est représentative de leurs différentes familles.

Considérés globalement, ces résultats contribuent à montrer que les races locales sont des ressources génétiques précieuses à préserver et à intégrer dans des schémas de gestion et d'amélioration génétique appropriés. Cette préservation apparaît cruciale dans le contexte actuel d'incidence croissante de croisements avec des races supposées plus productives (dans des conditions environnementales différentes) qui menace ces races locales. Elle l'est également dans le contexte du changement climatique qui impose de nouvelles contraintes environnementales. La prédiction génomique de la vulnérabilité des races face à ces contraintes constitue un nouveau champ de recherche, dont les résultats pourront permettre de promouvoir certaines races moins vulnérables dans un environnement donné et d'en déconseiller d'autres.

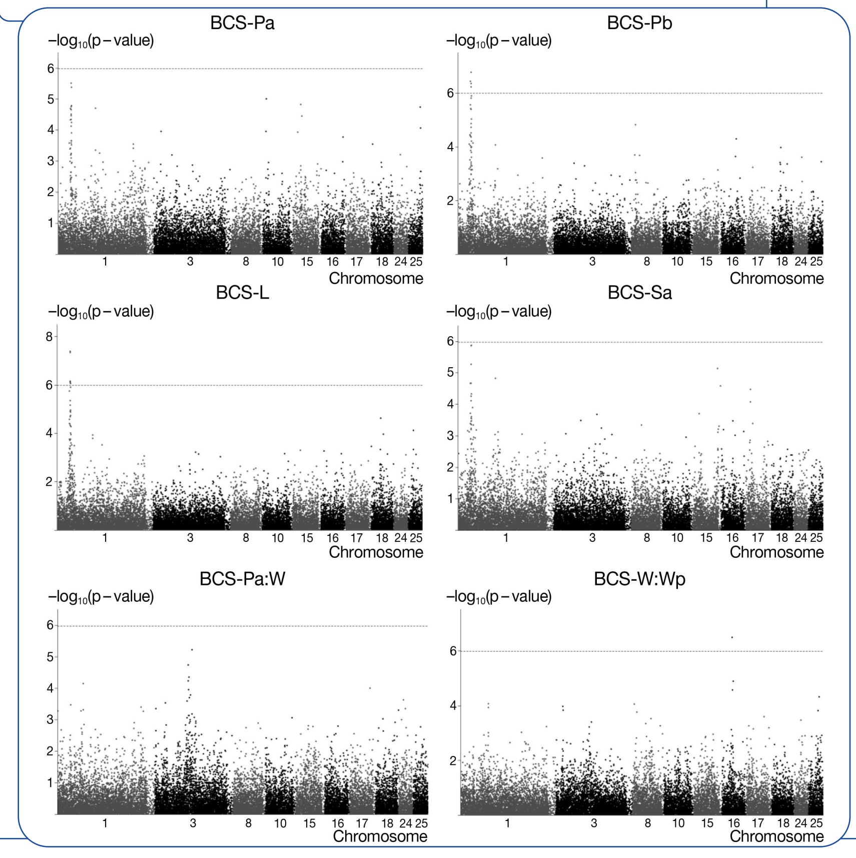
Étude de la variabilité génétique intratroupeau dans l'adaptation aux conditions contraignantes d'alimentation

En complément des travaux antérieurement cités chez les bovins, dans les conditions du Massif central en France, à la frontière avec la Méditerranée, nous avons démontré une composante génétique importante expliquant la variabilité intratroupeau dans les processus de mobilisation-reconstitution des RC chez la race ovine de viande Romane (Macé *et al.*, 2018a ; 2018b ; 2019). Nous avons caractérisé et identifié le spectre des profils de PV et de NEC présents chez les femelles du troupeau et démontré une variabilité intratroupeau de ces paramètres et leurs dynamiques pendant les phases de mobilisation et de reconstitution à l'échelle du cycle de production, et pendant toute la carrière de la brebis. Des valeurs d'héritabilité h^2 supérieures à 0,2 ont été obtenues, confirmant l'influence de facteurs génétiques dans la variation de ces paramètres chez la race Romane. De fortes corrélations phénotypiques et génétiques entre les phases de mobilisation et de reconstitution ont également été estimées (Macé *et al.*, 2018 ; 2019). De plus, nous avons identifié les *quantitative trait locus* (QTL) responsables de la variabilité détectée dans la dynamique des RC (figure 2.12). Quelques gènes candidats ont été identifiés, dont trois intéressants : le gène LEPR, qui code pour le récepteur à la leptine, une hormone plasmatique très importante dans la régulation des taux d'adiposité et l'ingestion chez les mammifères, le gène du récepteur métabotropique glutamate 1 (GRM1) et enfin le gène TRPS1 (*Tricho-rhino-phalangeal syndrom type I*) associé au gain de poids pendant la période postsevrage, et régulateur de l'axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien agissant sur le stockage et les dépenses énergétiques. Ces résultats ouvrent des pistes intéressantes pour la mise en valeur de ce caractère d'adaptation (RC) dans la conception de schémas d'amélioration génétique adaptés aux nouveaux défis (changement climatique et transition agroécologique des systèmes d'élevage), où la contribution de la composante animale dans la résilience globale des systèmes devrait être importante.

Gestion de l'adaptation des races locales à l'échelle des élevages au travers des pratiques des éleveurs

Les caractéristiques d'adaptation des races locales à leur milieu en font des ressources théoriquement intéressantes à mobiliser par les éleveurs des zones concernées. Nous verrons cependant que ce n'est pas si simple et que la notion d'adaptation peut renvoyer à la fois à une diversité de définitions et de perceptions, mais aussi à de multiples pratiques mises en œuvre pour la gérer ou la valoriser.

Figure 2.12. Identification des QTL responsables du niveau d'état corporel (BCS pour *body condition score*) chez la brebis Romane pendant plusieurs stades physiologiques (Macé *et al.*, 2022).



Le $-\log_{10}$ (p – value) pour tous les SNP (*single nucleotide polymorphism*) a été tracé pour les chromosomes 1, 3, 8, 10, 15, 16, 17, 18, 24 et 25. La ligne pointillée indique le seuil de signification à l'échelle du génome ($BONF_{gen}$ = 5,94). Les seuils de signification à l'échelle du chromosome étaient OAR1 : 5,02, OAR3 : 4,96, OAR8 : 4,57, OAR10 : 4,52, OAR15 : 4,49, OAR16 : 4,45, OAR17 : 4,42, OAR18 : 4,43, OAR24 : 4,14, OAR25 : 4,26.

Gènes candidats en lien avec des caractères de gras et des voies métaboliques lipidiques.

BCS-Pa : note d'état corporel en début de gestation.
BCS-Pb : note d'état corporel en fin de gestation.
BCS-L : note d'état corporel pendant la lactation.
BCS-Sa : note d'état corporel en début de phase d'allaitement, après mise bas.
BCS-Pa:W : note d'état corporel pour la période commençant au début de la gestation et finissant juste après le sevrage.
BCS-W:Wp : note d'état corporel pour la période commençant juste après le sevrage et allant jusqu'à 1 mois après le sevrage.

Cinq principales régions identifiées sur les chromosomes OAR1, 3, 8, 9, 11.

Gènes candidats en lien avec des caractères de gras et des voies métaboliques lipidiques.

Pa : début de gestation.
Pb : fin de gestation.
L : pendant la lactation.
Sa : début de phase d'allaitement, après mise-bas.
W : juste après sevrage.
Wp : allant jusqu'à 1 mois après le sevrage.

La perception par les éleveurs de l'adaptation des races locales renvoie à une diversité de caractéristiques animales

Dans le cadre de l'étude génétique des races bovines locales méditerranéennes évoquée précédemment, vingt enquêtes ont été effectuées auprès d'éleveurs de la race bovine Corse afin de mieux caractériser leur perception de l'adaptation de la race[10]. Ces entretiens semi-directifs, auprès d'éleveurs de montagne et de plaine, sélectionneurs ou non, croisant ou pas avec d'autres races, appartenant ou non à l'association de gestion de la race, concernaient les thèmes suivants : histoire de l'exploitation, caractéristiques du système d'élevage, points de vue et pratiques liées à l'adaptation, lien à l'action collective autour de la race. Non seulement ces enquêtes rendent compte de la diversité des caractéristiques d'adaptation citées par les éleveurs (tableau 2.4), mais l'analyse thématique des entretiens a permis de préciser la diversité des façons de voir chacune des caractéristiques d'adaptation. En analysant les parties des entretiens associées à l'« autonomie de l'animal pour s'alimenter » par exemple, on observe que ce thème est associé selon les éleveurs à diverses caractéristiques animales : faibles besoins des animaux de la race, comportement alimentaire, état corporel qui est vu selon les éleveurs comme une caractéristique de la race positive ou négative, ressources alimentaires diverses valorisées par la race. Cette analyse donne aussi des éléments sur les conséquences perçues de cette autonomie, qui concernent le faible coût associé, la facilité de gestion, le fait que l'activité soit peu demandeuse en temps ou encore le fait que cette autonomie pouvait être en inadéquation avec les attentes sociales. Enfin, cette analyse permet d'expliciter les points de vue des éleveurs sur les causes de cette autonomie : certains éleveurs considèrent que c'est la morphologie de la race qui permet cette adaptation, certains la considèrent comme innée alors que d'autres considèrent qu'elle peut s'acquérir, et enfin certains éleveurs considèrent que les pratiques peuvent influer favorablement ou défavorablement sur cette adaptation (Lauvie *et al.*, 2013).

Tableau 2.4. Fréquences de citation des caractéristiques d'adaptation mentionnées par les éleveurs de vache Corse enquêtés.

	Pourcentage des éleveurs enquêtés qui citent au moins une fois le critère dans l'ensemble de l'entretien
Autonomie de l'animal pour s'alimenter	100 %
Morphologie et aspects extérieurs	100 %
Reproduction	95 %
Adaptation au territoire	90 %
Comportement	85 %
Résistance	80 %
Qualité de viande	20 %
Entretien du territoire	50 %

10. Entretiens menés lors du stage de césure de C. Rolland, INRAE, UR LRDE (2012-2013).

La prise en compte de l'adaptation dans les pratiques des éleveurs et la gestion collective

Les perceptions de l'adaptation des races locales par les éleveurs sont importantes à prendre en compte car elles interagissent avec les pratiques et choix de gestion de ceux-ci. Le travail de thèse de Lola Perucho (2018) a permis, à partir des cas de l'élevage ovin laitier en Corse et en Thessalie, d'expliciter les pratiques de gestion génétique mises en œuvre par les éleveurs, en lien avec leur système d'élevage. Ce travail met en évidence différentes modalités selon lesquelles les caractéristiques d'adaptation des races locales ou des individus animaux sont en jeu dans ces processus.

Les caractéristiques d'adaptation peuvent entrer en jeu dans le choix des types génétiques élevés. Ainsi, l'étude des trajectoires de plusieurs éleveurs de Thessalie pour analyser les changements de races et les changements de systèmes d'alimentation (composantes pastorales de ces systèmes en particulier), révèle que, chez les éleveurs qui identifient une inadéquation entre composition génétique du troupeau et système d'alimentation, trois types de réponses sont possibles : croisement avec une race locale, arrêt de l'utilisation d'une race hautement productive ou essai d'une autre race, ou modification du système d'alimentation. Lorsque la première réponse est choisie, c'est bien en lien avec les caractéristiques d'adaptation attribuées à la race locale (Perucho, 2018).

La notion de rusticité, souvent mise en avant lorsque l'on parle de races locales, peut renvoyer à une diversité de traits selon les éleveurs, et également à diverses modalités de gestion. Pour certains éleveurs de brebis Corse par exemple, celle-ci peut renvoyer à différentes acceptions : sensibilité aux maladies ou aux conditions climatiques, valorisation des parcours en lien avec la production, aptitudes à la marche, longévité des femelles (Perucho, 2018). Quelques éleveurs sélectionnent individuellement leurs reproducteurs sur la rusticité à travers des indicateurs indirects, essentiellement morphologiques (robe, standard). D'autres considèrent que cette rusticité est « acquise » via la race ou les conditions d'élevage. Par exemple, la transhumance permet une sélection *de facto* par élimination des brebis les moins aptes à suivre le troupeau (pertes d'animaux) (Perucho, 2018).

Pour un même trait d'adaptation, les leviers mis en œuvre par les éleveurs pour obtenir un troupeau en adéquation avec leurs attentes sont multiples : par exemple, sur 23 éleveurs corses mentionnant la sensibilité aux maladies comme un trait d'intérêt, un seul éleveur en fait un critère de choix du renouvellement interne, quand la majorité en font seulement un critère de réforme (Perucho, 2018). Au-delà des pratiques de renouvellement interne et de réforme, d'autres leviers peuvent également entrer en jeu comme les critères de choix des éleveurs fournisseurs de reproducteurs mâles (Perucho, 2018).

Les travaux de Perucho (2018) soulèvent également les questions d'interactions entre choix individuels des éleveurs et outils de gestion collective de la race. Parmi les huit éleveurs sélectionneurs de brebis Corse enquêtés dans ce travail, tous prennent en compte les critères de production laitière et d'index (valeur génétique estimée) pour choisir les mères à agnelles. Cependant, six d'entre eux prennent aussi en compte d'autres critères (de deux à quatre critères supplémentaires selon les éleveurs, parmi lesquels l'ascendance,



la couleur de toison, le standard de race, le comportement à la traite, la persistance laitière, les caractéristiques des mamelles). Ils combinent ainsi l'usage d'un outil collectif et de critères individuels pour constituer un troupeau adapté à leurs attentes et à leurs systèmes (Perucho, 2018).

Enfin, les travaux qui s'intéressent aux pratiques des éleveurs de races locales révèlent aussi que dans les processus qui rendent les races adaptées à certaines situations ou contraintes, d'autres dimensions que les seules dimensions biologiques peuvent être considérées, comme des dimensions plus sociales ou organisationnelles liées aux races. Ainsi Perucho *et al.* (à paraître) illustrent par exemple comment l'organisation collective des éleveurs autour d'une race peut contribuer à faire face à un aléa sanitaire auquel les animaux de la race sont confrontés.



Les questions d'adaptation des races locales mettent donc en jeu des caractéristiques biologiques et génétiques, valorisées et gérées par les éleveurs dans leurs pratiques individuelles et collectives. La caractérisation des mécanismes biologiques et génétiques à l'œuvre apporte des informations précieuses pour améliorer la gestion de ces races. Réciproquement, mieux connaître les pratiques des acteurs de la gestion, et en premier lieu des éleveurs, ainsi que les points de vue qui les sous-tendent, participe à la compréhension de l'évolution des ressources génétiques. L'intégration d'approches relevant de disciplines complémentaires est nécessaire à une meilleure compréhension des interactions entre populations humaines, populations animales et milieux d'élevage, dont l'adaptation des populations animales est une des conséquences.

Les mécanismes d'adaptation analysés à l'échelle des familles et des collectifs locaux

Jacques Lasseur, Véronique Alary, Lina Amsidder, Martine Napoléone, Abdrahmane Wane

Cette partie s'intéresse à l'analyse des processus d'adaptation des ménages pastoraux et agropastoraux en zones arides et méditerranéennes, considérant conjointement les dimensions sociales et biotechniques impliquées. Nous analysons particulièrement la contribution de trois leviers : (i) la diversité des situations considérée au niveau des ménages sous l'angle de « portefeuille capacitaire » et au niveau local sous l'angle d'une diversité de systèmes de production, (ii) l'importance des institutions et organisations collectives considérées au travers des réseaux sociaux et des actions collectives, (iii) les formes d'apprentissage en considérant les références aux normes et valeurs qui guident l'action. Les recherches menées en Égypte, au Tchad, au Maroc et en France et présentées ici illustrent la manière dont les éleveurs les mobilisent et les combinent parfois, permettant ainsi le passage d'une situation qui fragilise les ménages à une situation qui renforce les solidarités et conforte leur durabilité.



Le portefeuille capacitaire des ménages comme capital permettant la mise en œuvre des adaptations

Dans le cadre de projets successifs en Égypte entre 2011 et 2021, une approche systématique des conditions d'existence des ménages ruraux a été développée s'appuyant sur le cadre conceptuel des conditions de vie développé par Scoones et opérationnalisé par Ellis (*Sustainable livelihood Framework*). Sur le plan conceptuel, on peut distinguer les capacités humaines (la composition du ménage et son degré d'implication dans des activités hors exploitation et ce en lien avec le niveau d'éducation), physiques (les surfaces cultivées, leur statut et la composition numéraire du troupeau par espèce) et fonctionnelles (incluant la diversification des pratiques d'approvisionnement et usage des intrants comme la valorisation des produits et coproduits à l'interaction entre les activités agricoles et d'élevage, que ce soit à l'échelle du ménage, de la communauté étudiée ou du marché). Cette dernière capacité est très connectée aux réseaux sociaux existants, comme à la capacité d'organisation intraménage et intracommunauté, mais aussi en lien avec les réseaux familiaux étendus ou formels. Ces capacités ont été mises en rapport avec les conditions de vie (du moment étudié). Ces dernières ont été appréhendées au travers d'indicateurs de profitabilité (marge brute), de sécurité alimentaire (degré d'autonomie alimentaire approchée par la couverture familiale des besoins en calories et protéines) et de trésorerie pour satisfaire les besoins de base (notamment la santé, l'éducation et l'alimentation du ménage). Plusieurs approches ont été mobilisées à savoir les approches de discours sur la base des récits de vie (permettant de comprendre l'accumulation ou pas de capital physique), des approches multifactorielles (mettant en exergue des liens entre les différentes capacités) et des approches multicritères pour approcher les processus causaux entre les différentes formes de capacités et les conditions de vie.

L'ensemble des travaux montre que la diversification des activités et des pratiques, agricoles et non agricoles, constitue un moyen (capacité d'action) de soutien des conditions de vie des ménages face aux aléas présents, que ce soit une sécheresse ou une dépense de santé ou cérémonielle importante. Et l'intensité de cette diversification est fortement dépendante de la diversité des réseaux sociaux, particulièrement au niveau local. En revanche, cette diversification des activités et des pratiques n'est pas systématiquement garante d'une amélioration des conditions de vie. D'ailleurs, elle est le plus souvent développée à l'extrême dans des ménages ayant peu de capital physique et dont la viabilité intergénérationnelle à travers l'assise foncière est fortement compromise (Alary *et al.*, 2014 ; 2016). Concernant la capacité d'adaptation à moyen terme, les travaux montrent comment la diversification des systèmes d'élevage en matière d'espèces animales, de conduites de l'alimentation et de valorisation des produits et coproduits permet de faire face à différents aléas. À titre d'exemple, dans les nouvelles terres aménagées à l'Ouest Delta, l'élevage multiespèce a permis d'une part de financer les coûts d'installation (que ce soit un étage de maison ou la mise en culture des sols) avec la vente annuelle des veaux, et d'autre part les coûts opérationnels du ménage et de la ferme grâce à la vente des produits ovins (Alary *et al.*, 2018). Concernant la capacité à long terme (relative à la transmission intergénérationnelle), l'étude dans la région de la

vallée du Nil montre comment l'élevage notamment grâce à la diversification vers des espèces plus prolifiques (ovin et caprin) peut devenir le principal garant de la viabilité des systèmes de production, en lien avec la fragmentation des terres (Alary *et al.*, 2015).

En résumé, l'activité d'élevage est garante de la viabilité des ménages ruraux et de la durabilité des systèmes, comme souligné dans d'autres situations (Duteurtre et Faye, 2003 ; Pica-Ciamarra *et al.*, 2015). Cette capacité de l'activité d'élevage à contribuer à l'adaptation des ménages ruraux au changement de leur environnement social, économique ou climatique est à rechercher dans la combinaison variable et adaptable des différents services, produits et coproduits qu'elle génère, en plus de sa valeur immatérielle en matière de reconnaissance.

Rôle de la famille dans les mécanismes d'adaptation des sociétés pastorales sahéliennes face aux chocs

Les agropasteurs en zone sahélienne vivent et opèrent dans un environnement sujet à de multiples chocs et aléas. La variabilité du climat a un impact direct sur la dynamique des ressources naturelles, amenant ainsi les pasteurs à gérer une distribution spatio-temporelle inégale de ces ressources. Cette variabilité climatique est également un facteur d'aggravation d'autres perturbations de natures économique, sociale, culturelle et politique. Par ailleurs, les pasteurs sont confrontés à un manque de biens et services économiques de base qui affecte significativement leurs conditions de vie et d'activité. La distribution inégale des ressources productives s'accompagne d'une information limitée sur les marchés de biens et services de sorte que les pasteurs sont incités à adopter une position prudente et contingente à leur environnement socio-économique (Wane *et al.*, 2020b). C'est ainsi que les pasteurs doivent arbitrer en permanence entre leurs besoins de consommation à court terme et leur stratégie de constitution d'un troupeau à long terme pour satisfaire leur consommation future (Fadiga, 2013).

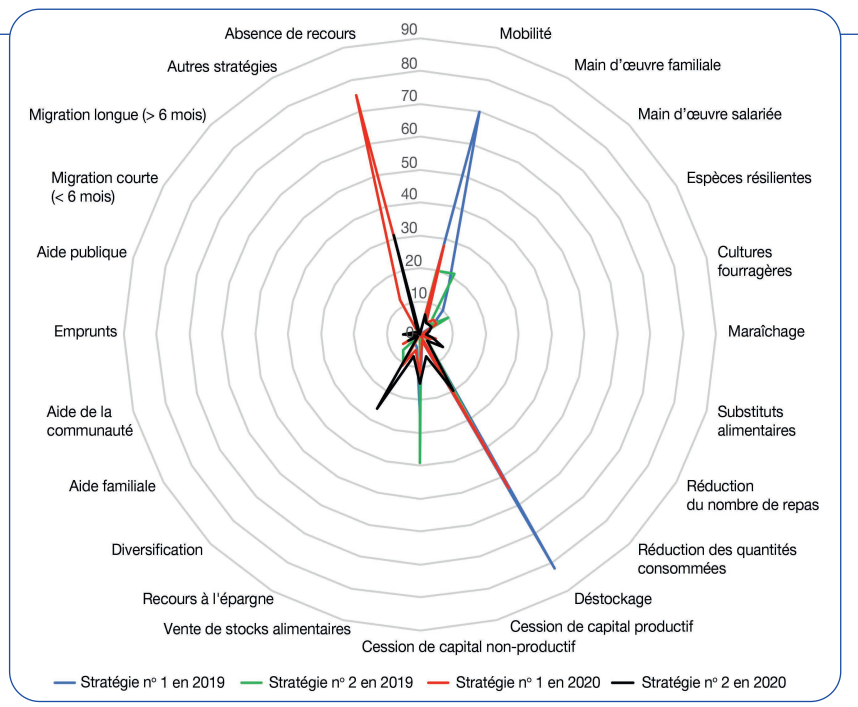
Les chocs multiformes auxquels sont confrontés les pasteurs peuvent être de nature « idiosyncratique » lorsqu'ils touchent exclusivement un ménage ou « covariante » lorsqu'ils affectent un groupe de ménages, une communauté, un village, une région, une zone agroécologique ou un pays (Wane *et al.*, 2020a). Face aux chocs idiosyncrasiques, les ménages pastoraux réagissent en partant de leurs perceptions et essayent de les surmonter en mobilisant à court ou moyen terme leurs compétences et ressources propres disponibles telles que leurs réseaux sociaux familiaux et leur cheptel (***coping capacity***). Face aux chocs covariants, ils mettent en œuvre leurs facultés à s'ajuster, à atténuer les effets préjudiciables des chocs ou à exploiter leurs effets bénéfiques notamment à travers différents régimes de mobilité (***adaptative capacity***). Les réponses différenciées des pasteurs aux chocs multiformes peuvent laisser transparaître l'importance de leurs perceptions des variations de leur environnement. Une illustration peut être apportée par le cas des ménages (agro)pastoraux des régions du Wadi Fira, du Batha et de l'Ennedi au Tchad. Dans un premier temps, 504 ménages ont été interrogés en 2015 à travers des questionnaires détaillés sur leurs conditions d'activité et de vie. Après construction d'une typologie de ces ménages, un échantillon d'une centaine de ménages a été sélectionné pour répondre successivement

en 2019 et en 2020 aux mêmes questionnaires augmentés de données de chocs. L'objectif était d'identifier à dires d'acteurs différents scénarios de chocs subis au cours d'une période prédéterminée, de prioriser les trois chocs ayant eu le plus d'effet sur leurs revenus, patrimoine, production et achats alimentaires, stocks de produits alimentaires et cheptel et de classer différentes stratégies d'adaptation en fonction de leur importance.

Les pasteurs de ces trois importantes régions d'élevage du Tchad indiquent que la sécheresse est ressentie de la même façon en 2019 et 2020 (environ 15 % des déclarations reportées par les ménages). *A contrario*, la perception des effets des feux de brousse et des inondations est atténuée et aucune déclaration de pluies hors saison n'a été enregistrée. L'occurrence de maladies animales s'est accrue alors que les problèmes d'accès aux soins vétérinaires semblent relativement moins ressentis. Même si elles sont proportionnellement faibles, les dépenses de santé animale se sont accrues, passant de 4 à 8 % des fréquences de déclarations. Les chocs de prix se sont accentués entre 2019 et 2020 avec un fort ressenti de hausse des prix des denrées et des aliments de bétail alors que les prix des animaux fléchissaient.

Dans ce contexte de chocs multiformes, les ménages (agro)pastoraux ont développé toute une panoplie de stratégies déployées par séquence et mises en œuvre de façon priorisée (figure 2.13).

Figure 2.13. Évolution des stratégies déployées par les ménages (agro)pastoraux avant et pendant la pandémie de Covid-19 (Wane *et al.*, 2020a).



En 2019, les ménages ont prioritairement cherché (stratégie nº 1) à déstocker du bétail (35 % des fréquences de réponses), à adopter la mobilité (30 %) ou à céder du capital non directement productif (10 %) tels que les bijoux. Comme stratégie secondaire (stratégie nº 2), ils ont privilégié la cession de capital non productif (22 %) puis le déstockage (21 %) et enfin, le recours à la main-d'œuvre familiale (12 %).

En 2020, il y a eu une évolution en forme de sidération de la part des agropasteurs qui, avec les effets de la pandémie de Covid-19 (restriction drastique des mouvements et interdiction des rassemblements), ont perdu en moyenne 34 % de leurs revenus globaux. En effet, les ménages ont déclaré n'avoir aucune stratégie (32 %) et dans une moindre mesure, chercher à déstocker (23 %) voire adopter la mobilité (12 %). Comme stratégies secondaires (stratégie nº 2), ils continuent à affirmer soit leur incapacité à développer une quelconque stratégie (19 %), soit l'utilisation de l'épargne familiale (16 %) et le déstockage (13 %). Ils ne cherchent pas à privilégier le recours aux aides, démontrant ainsi leur choix assumé de mobiliser des stratégies endogènes et de compter, d'abord, sur leur propre système d'actions plutôt que de s'appuyer sur des tiers sous forme de subventions, d'aides et de crédits.

Finalement, les pasteurs sahéliens arrivent à faire face à des chocs de natures diverses en mobilisant leurs ressources propres. Leurs capacités découlent d'un long processus d'apprentissage par la pratique (Wane *et al.*, 2020a). Néanmoins elles semblent être très limitées face aux chocs nouveaux comme celui de la pandémie de Covid-19. En effet, les stratégies gouvernementales pour contrôler la pandémie (restrictions des mouvements, interdiction des rassemblements) ont fortement altéré les moyens d'action individuelle et collective des éleveurs sahéliens.

Les recompositions des réseaux sociaux des éleveurs pastoraux pour accéder aux ressources pastorales

Les recherches menées sur les sociétés qui vivent de l'élevage camelin en zones arides et semi-arides au Maroc entre 2017 et 2021 ont mis en évidence l'importance des organisations collectives coutumières dans les pratiques de mobilité des éleveurs. L'analyse qualitative des entretiens semi-directifs menés entre juillet 2018 et février 2020 auprès d'un échantillon de 43 éleveurs camelins dans la région de Guelmim Oued Noun, au sud du Maroc, à propos de leurs pratiques de mobilité a souligné l'importance de la tribu. Dans un environnement aride et hostile tel que le Sahara, elle constitue un groupe d'appartenance, fondé sur la parenté et l'existence d'un ancêtre commun, au sein duquel les éleveurs bénéficient d'une « solidarité protectrice et nourricière » (Caratini, 2003). Qu'il s'agisse des personnes auprès de qui les éleveurs échangent des informations à propos de l'emplacement des pâturages ou de celles avec qui ils se déplacent ou campent, les éleveurs se tournent en grande majorité vers les membres de leur tribu, sur qui ils peuvent compter au nom de la fraternité et de l'importance des liens du sang. Les entretiens réalisés ont mis en évidence le système de dons/contredons sur lequel se fonde la solidarité tribale, qui repose entre autres sur les alliances maritales intratribales ainsi que sur

des dons d'animaux ou d'argent, lors de cérémonies telles que les fêtes tribales ou les mariages ou en cas de difficultés (divorce, conflits). Si la tribu constitue un réseau sur lequel les éleveurs peuvent se replier en cas de difficultés, elle est source d'une importante pression sociale dans la mesure où l'ensemble de ses membres se doit d'honorer le système fondé sur la réciprocité de l'échange, sous peine de « devenir un paria, à la merci de toute calamité » (Gaudio, 1993).

La bibliographie historique allant de la période précoloniale aux années d'indépendance (1958) ainsi que les entretiens ouverts menés en décembre 2019 auprès de cinq chioukhs[11] et quatre femmes ayant entre 50 et 60 ans accompagnées de leurs enfants d'une vingtaine d'années ont mis en évidence les nombreux changements sociopolitiques qu'ont connus les zones sahariennes et présahariennes marocaines. Le cadre d'analyse de la géographie politique nous a conduits à lire ces changements en termes de recompositions des rapports de pouvoir entre acteurs coutumiers tribaux et acteurs étatiques pour le contrôle de l'espace pastoral. Les éleveurs se sont adaptés à ces recompositions en diversifiant leurs réseaux pour accéder aux ressources pastorales. Durant la période précoloniale, l'espace pastoral était constitué d'une « mosaïque » de territoires tribaux (Caratini, 2003), qui évoluait au gré des guerres tribales durant lesquelles chaque tribu faisait en sorte d'étendre le territoire sous son contrôle. Le réseau tribal était ainsi le seul dans lequel s'inscrivaient les individus et dont ils dépendaient pour accéder aux terres de la tribu et avoir la garantie d'être en sécurité et protégé. La colonisation espagnole et française à partir de la fin du XIXe siècle a engendré la mise sous tutelle des tribus, la fixation de frontières étatiques et l'arrêt des guerres tribales au nom de la « paix coloniale ». Le réseau tribal était encore le réseau fondamental mais, du fait du climat de sécurité instauré sur les parcours à la suite de la « pacification », les éleveurs avaient une plus grande liberté de mouvement. Les relations avec les voisins d'autres tribus prenaient une place de plus en plus importante dans la mesure où les éleveurs s'appuyaient dessus pour accéder à de nouveaux parcours. Depuis l'indépendance du Maroc en 1958, la question du contrôle territorial est au cœur des préoccupations étatiques. Cela se traduit par un quadrillage de l'espace pastoral à travers une superposition de territoires étatiques (caïdats, communes rurales), au sein desquels l'État accorde un pouvoir de contrôle sur l'espace et les populations à plusieurs acteurs (caïds, présidents de Communes, chioukh). Ce contrôle étatique ne se traduit pas par une diminution du pouvoir de l'acteur coutumier tribal. La tribu continue en effet à agir de façon implicite en intégrant les institutions étatiques. Les fils ou petits-fils des chefs coutumiers de la période coloniale ou descendants de grandes familles se sont ainsi vu attribuer des fonctions officielles (chioukh, présidents de Communes) et s'appuient dessus pour défendre le territoire coutumier. Face à un maillage territorial de plus en plus complexe, où territoires coutumiers et étatiques s'enchevêtrent, les éleveurs doivent ainsi entretenir des réseaux auprès d'une diversité d'acteurs, de manière à faire accepter leur présence dans différents territoires au sein desquels s'insèrent les ressources pastorales.

11. Chefs coutumiers qui sont également des agents d'État.



Des adaptations individuelles à la durabilité des actions collectives dans le cas d'un produit de terroir

Dans cet exemple, nous examinons la tension dans le processus d'adaptation aux transformations des systèmes alimentaires entre le développement de dynamiques de territorialisation et la gestion dans le temps d'un produit de terroir, vu comme un bien commun. Nous nous appuyons sur des travaux conduits dans le sud-est de la France portant sur les transformations des activités laitières et fromagères, notamment au sein des collectifs gérant des produits de terroir (Napoléone, 2016). Ces travaux concernent les trajectoires des activités laitières fromagères dans les territoires, ainsi que les articulations entre des dynamiques individuelles et collectives. Pour cela, des entretiens compréhensifs ont été conduits auprès d'éleveurs, d'acteurs des collectifs de produits de terroir ou d'acteurs territoriaux entre 1990 et 2020.

Les syndicats d'appellation d'origine protégée (AOP) constituent un lieu de construction de normes et de valeurs autour d'un projet commun, pour une diversité d'acteurs concernés par un produit de terroir : producteurs fermiers ou laitiers, affineurs, entreprises de transformations artisanales, PME (petites et moyennes entreprises) ou groupes nationaux. Chaque acteur a ses objectifs, des stratégies propres par exemple en matière de commercialisation, mais tous partagent la même préoccupation de différentiation et de protection d'un produit.

Ainsi, depuis les années 1990, pour se protéger des copies hors zone, les producteurs et transformateurs des quatre filières fromagères caprines du sud-est de la France (Picodon, Pélardon, Banon, Brousse du Rove) ont demandé la reconnaissance officielle de leur produit par un signe de qualité lié à l'origine. L'AOP a donc constitué, pour les divers acteurs concernés, un moyen de s'identifier, de tirer parti de leur spécificité et de se protéger de copies hors zone, à une époque où les circuits longs constituaient l'essentiel des formes de distribution. Le cheminement vers la certification a permis aux acteurs de ces filières de se reconnaître autour de valeurs communes portant sur les pratiques de transformation fermières et artisanales, et les pratiques d'élevage, puis de gérer ces valeurs dans le temps, au fil des révisions de cahier des charges, afin de s'adapter à un certain nombre de changements, par exemple l'évolution des valeurs sociétales, en mettant en avant le lien aux ressources locales.

Actuellement, le développement de dynamiques de territorialisation, l'engouement pour le local et la proximité favorisent l'émergence de formes de vente mettant en relation directe des producteurs et des consommateurs. Ces dynamiques multiplient et diversifient, pour les producteurs fermiers notamment, les possibilités de vente de produits. Ceci encourage des dynamiques individuelles, les producteurs redéfinissant les attentes envers les façons de produire et les produits, directement avec leurs partenaires et avec les consommateurs. Les lieux de réflexions et d'échanges autour du produit local s'atomisent et se diversifient. Dans certaines AOP, le renouvellement des opérateurs est une difficulté. Si ce type de dynamique se poursuit, il peut y avoir un risque de perte d'un lieu où se discute collectivement la qualité.

On voit bien ici comment l'adaptation individuelle à une situation qui évolue (la multiplication des débouchés en circuits courts) peut mettre à mal un enjeu collectif autour de la gestion d'un bien commun. Toutefois, ce produit est un bien attaché à un territoire, qui tire parti des valeurs du territoire. Inversement, le territoire construit son image et son attractivité à partir de ses ressources. Par ailleurs, le produit constitue un messager du territoire à travers les divers circuits de ventes, du local au global.

Dans une perspective de durabilité, il y a un enjeu, travaillé par les AOP, à renforcer les synergies entre les dynamiques territoriales et celles attachées aux produits de terroir et aux stratégies individuelles. L'adaptation à l'échelle des collectifs porte alors sur (i) la connectivité entre les réseaux, ceux liés à la gestion du produit et ceux liés aux dynamiques territoriales, (ii) l'ouverture à des points de vue divers, (iii) le multiéchelle.

La diversité des modalités d'échanges entre éleveurs et autres acteurs pour réinscrire les activités pastorales dans le territoire

L'élevage pastoral en arrière-pays provençal, essentiellement ovin, s'est modifié au cours des dernières décennies sous l'effet de l'évolution des conditions de l'exercice de l'activité dans un processus d'adaptation ou de transformation. Sur la base d'une étude conduite à l'échelle d'un pays des Alpes-de-Haute-Provence (Lasseur et Dupré, 2017), nous analysons *ex post* la contribution de ces adaptations à l'expression d'une diversité actuelle de modalités d'exercice de l'activité. En retour, nous illustrons le rôle de cette diversité renouvelée et des modalités d'échanges entre parties prenantes dans la redéfinition en cours du système d'élevage local. Pour se faire, nous prenons appui sur les propositions théoriques et méthodologiques de J.-P. Darré visant à appréhender la production de connaissances pour l'action ainsi que leurs transformations en les considérant régies par des normes et valeurs qui s'élaborent dans des collectifs (Compagnone *et al.*, 2015).

Nous identifions 3 types d'élevage contrastés : les petits paysans de montagne (PPM), les doubles transhumants pastoraux (DTP), les éleveurs diversifiés (DIV) qui se distinguent (i) par les structures d'exploitation, (ii) par des pratiques spécifiques et emblématiques, (iii) par un sens donné au métier et (iv) par des relations particulières hors du secteur agricole. Ces caractéristiques leur donnent un poids particulier dans les innovations qui ont marqué la période récente ainsi que dans celles qui sont en germe actuellement (tableau 2.5).

La proximité entre une exploitation et l'un ou l'autre de ces idéotypes est à relier à des conditions spécifiques de localisation ou d'allocation en ressources. Ainsi, les éleveurs diversifiés sont plutôt à la tête d'exploitations de petite taille. Ces affiliations relèvent aussi de choix de vie et de visions du métier qui conduisent à mettre en exergue telle ou telle pratique structurante des orientations de production. Ainsi les PPM mettent en avant la culture de fourrage (et la mécanisation) ainsi que la pratique du pâturage en parc. Ceci en opposition aux DTP pour qui un pilier de leur système est de favoriser au maximum



le pâturage, de pratiquer la garde de troupeau de grande taille, signe de passion pour le métier en référence à la figure emblématique du « berger ». Ceci a conduit ces derniers à développer la mobilité hivernale afin de permettre le pâturage tout au long de l'année. En retour, cela leur a permis de s'affranchir d'une limite d'effectifs élevés conditionnée par la quantité de fourrage récoltable sur les terres cultivées permettant l'hivernage du troupeau en bergerie, qui fonde le raisonnement des PPM pour le dimensionnement de la troupe. Les options d'adaptation à l'échelle des exploitations ne reposent ainsi pas uniquement sur les structures héritées, mais aussi sur les capacités à se saisir, créer des opportunités d'alternatives qui doivent toutefois rester compatibles aux normes et valeurs locales (sous peine de marginalisation).

Tableau 2.5. Principales caractéristiques des trois idéotypes d'élevage identifiés.

	Structure d'exploitation	Pratiques emblématiques	Vision du monde	Filiation et condition d'émergence	Relations aux autres parties prenantes (hors agriculture)	Implication dans des adaptations et transformations en cours
Petit paysan de montagne (PPM)	300 à 500 brebis 50 à 100 ha cultivables	Dessaisonnement de la production Vente d'agneaux sous label	Se soutenir entre acteurs du secteur pour maintenir la société rurale	Lié à la politique de modernisation de l'élevage (1960)	Faibles : centré sur le secteur agricole	Recherches d'amélioration de la productivité du travail et des marges de l'exploitation
Double transhumant pastoral (DTP)	500 à 2 500 brebis Pas ou peu de terres cultivées	Mobilité de grande amplitude Privilégie le pâturage des animaux et le gardiennage du troupeau	Affirmer une passion des relations au troupeau Se donner des marges de liberté individuelle	Pratique historiquement présente Conforté par la mise en œuvre de politique agroenvironnementale (1990)	Moyennes : relations hors zone aux détenteurs du foncier et aux opérateurs de l'environnement	Renforcer la contribution du pâturage à la maîtrise des dynamiques écologiques des milieux « semi-naturels »
Diversifié (DIV)	Jusqu'à 300 brebis dans des exploitations diversifiées	Vente en circuits courts Accueil Mises en valeur de ressources locales	S'impliquer dans des interactions locales et valoriser l'activité auprès des non-agriculteurs	Historiquement option par défaut d'alternatives Conforté actuellement par les initiatives de développement local	Élevées : vers les consommateurs Implication dans les associations locales Fonctions électives	Développement des circuits courts Associer le développement de l'élevage au développement touristique et au multiusage de l'espace pastoral

Tous les éleveurs rencontrés s'affilient assez clairement à l'un ou l'autre des idéotypes et marquent des distances aux choix opérés par des éleveurs qui sont plus proches d'un autre type. Néanmoins, tous s'accordent aussi à reconnaître qu'il est possible et légitime de pratiquer autrement qu'eux-mêmes ne le font. Ceci permet à certains de

transcender les catégories et d'investir les pratiques archétypiques d'autres formes d'élevage : ainsi, par exemple, un PPM affiche sa passion du gardiennage qu'il met en œuvre comme berger d'alpage en sous-traitant des activités de culture. Un autre PPM mobilise des aménagements sylvopastoraux et développe ainsi des interactions fortes à des acteurs territoriaux hors secteur. Cette fluidité est à mettre à l'actif d'espaces permettant l'échange de point de vue, en particulier au sein des groupements pastoraux, instances d'organisations collectives de l'estive. Ainsi, tous ces éleveurs se retrouvent dans les espaces de pâturage estivaux, voire y mélangent leurs troupeaux au sein des entités collectives que constituent les groupements pastoraux. Tout autant que la structuration d'un secteur fort et de filières organisées, les adaptations/transformations confortant le futur des activités d'élevage dans ces espaces reposent sur les capacités à nouer des alliances avec d'autres acteurs et sur la relégitimation de l'activité d'élevage, de la fluidité dans la circulation des idées et points de vue, allant au-delà des seuls acteurs agricoles, permettant de faire évoluer les normes et valeurs qui encadrent l'activité. Le rôle des DIV et DPT est de ce point de vue fondamental, car ils assurent la porosité du système d'élevage local aux enjeux portés par des acteurs du territoire, hors secteur agricole.



Ces cinq études de cas illustrent le lien entre les trois dimensions – (i) diversité, (ii) rôle des organisations et institutions et (iii) formes d'apprentissage pour conforter les capacités d'adaptation. Ces dernières s'opèrent tant à l'échelle des familles d'éleveurs qu'à celle de l'ensemble de l'activité. La diversité est impliquée en ce qu'elle permet aux familles de s'appuyer sur un portefeuille de ressources pour faire face à l'incertitude. Cette dimension est aussi fortement impliquée dans ses capacités à promouvoir l'innovation dans les collectifs. Cette capacité collective de réponse à des modifications des conditions d'exercice de l'activité est alors très liée aux institutions et réseaux qui permettent l'expression de solidarités et constituent des lieux d'apprentissage.

Ces études de cas mettent en évidence les mécanismes d'adaptation de l'activité d'élevage et des familles d'éleveurs aux évolutions des conditions d'exercice de l'activité. La diversité en est une des composantes, que ce soit le portefeuille capacitaire des ménages soutenant les conditions de vie des ménages ou la coexistence d'une diversité de systèmes d'activité contribuant à adapter la gamme des normes et valeurs qui encadrent l'activité. Les organisations collectives et les institutions qui régissent les relations entre individuel et collectif, que ce soient les réseaux d'interactions sociales, les organisations traditionnelles ou les collectifs de projet, jouent aussi un rôle central dans l'émergence de ces adaptations et l'accompagnement des apprentissages. L'adaptation des sociétés d'éleveurs repose sur leur capacité à composer entre diversité et apprentissages en s'appuyant sur des organisations collectives formelles et informelles permettant de se réinventer au gré des changements environnementaux, sociaux, économiques, politiques et des chocs multiformes que connaissent les zones arides et méditerranéennes.



Trajectoires d'adaptation des élevages dans les territoires : quelle place pour le pâturage ? Quels déterminants ?

Claire Aubron, Johann Huguenin, Marie-Odile Nozières-Petit, René Poccard-Chapuis

Cette partie s'intéresse aux trajectoires d'adaptation des élevages dans des territoires contrastés situés sur trois continents, sur un pas de temps long de plusieurs décennies. Les recherches résumées ici s'attachent à : (i) reconstituer ces trajectoires d'adaptation, en accordant une importance particulière à l'évolution de la place du pâturage ; (ii) comprendre quels sont les déterminants de ces trajectoires, qu'ils soient locaux ou globaux ; (iii) évaluer dans quelle mesure ces trajectoires vont dans le sens d'un développement qui peut être qualifié de durable.

Causses et Cévennes : motomécanisation fourragère, éleveurs en voie de disparition

Depuis les années 1950, les exploitations agricoles des Causses et Cévennes ont connu comme ailleurs en France un processus de spécialisation et un agrandissement continu de leur taille. Les conditions de milieu, moins favorables qu'en plaine à l'accroissement de la productivité physique du travail dans les productions végétales, ont favorisé une spécialisation dans l'élevage : ovin laitier ou allaitant sur les Causses, caprin laitier ou ovin allaitant dans les Cévennes. L'agrandissement des fermes s'est appuyé ici aussi sur une augmentation continue de leur niveau d'équipement qui atteint aujourd'hui plusieurs centaines de milliers d'euros par actif. Là où il était possible de les utiliser, des équipements de fauche motomécanisés de plus en plus puissants parfois assortis de dispositifs de distribution motomécanisée de fourrages ont permis une très forte augmentation des volumes produits par actif (jusqu'à vingt fois plus de lait qu'en 1950 en élevage ovin laitier caussenard), avec une contribution devenue faible du pâturage à la ration (Aubron *et al.*, 2016 ; 2019).

Nos recherches s'appuyant sur le cadre d'analyse de l'agriculture comparée montrent que ces évolutions, problématiques tant en matière d'emploi que de maintien de l'ouverture du milieu, correspondent à des adaptations des exploitations agricoles aux évolutions socio-économiques globales. Les politiques européennes et françaises de soutien à l'investissement, la baisse tendancielle des prix agricoles en termes réels, l'attribution faisant suite à l'abandon des politiques de prix à partir des années 1980 de subventions par hectare ou par tête sans mécanisme strict de plafonnement incitent en effet à l'agrandissement, voire ne laissent que peu de choix alternatifs. Ainsi, les exploitations les plus petites ou sans terres aisément motomécanisables n'ont pas été en mesure de réaliser ces adaptations et ont massivement disparu, laissant le paysage s'enfricher. Celles plus grandes et mieux situées (sols plus profonds sur les Causses, vallées plus larges dans les Cévennes) se sont équipées pour la conduite des cultures fourragères motomécanisées et se sont orientées vers l'élevage laitier sous signe de qualité (AOP Roquefort et Pélardon).

Celles moins dotées en main-d'œuvre et disposant de moins de terres motomécanisables ont souvent opté pour l'élevage allaitant, qui est plus pâturant mais crée peu d'emplois.

Un autre type de trajectoire axé sur la transformation des produits et leur commercialisation en circuits courts complète ce tableau : empruntée initialement par les néoruraux qui s'installent en élevage caprin fermier dans les zones laissées à l'abandon dans les années 1970, cette voie est désormais également explorée par des éleveurs ovin (Causses) ou caprin (Cévennes) qui jusqu'ici livraient leur lait et peinaient à s'agrandir ou à maintenir leur accès aux circuits de collecte. Pour des raisons similaires, des éleveurs allaitant développent la vente directe de viande pour tout ou partie de leur production (Nozières-Petit, 2019). En dehors de quelques exploitations dites économes, cette évolution vers les circuits courts et la transformation ne s'accompagne pas systématiquement d'un recours accru au pâturage dans l'alimentation des animaux (Garambois *et al.*, 2020). Elle n'en reste pas moins intéressante car elle témoigne d'adaptations aux conditions locales susceptibles de faire contrepoids à des déterminants nationaux et européens.

Amazonie brésilienne : recompositions des relations entre l'élevage et la forêt

L'élevage bovin a longtemps été emblématique de ces « veines ouvertes de l'Amérique latine » où E. Galeano (1971) dénonce le pillage des ressources naturelles, au détriment notamment des petits producteurs ruraux. La courte histoire du bœuf en Amazonie a bien commencé de cette façon. Le gouvernement fédéral, lançant en 1960 la « colonisation par la patte du bœuf », consacra l'élevage comme un outil d'occupation du territoire, donc de déforestation et de conflits fonciers.

C'est bien une terre d'élevage qui est née sur les cendres de la forêt : cinquante ans plus tard vivent en Amazonie brésilienne quatre fois plus de bovins que d'humains. 86 millions de zébus y broutent des pâturages grands comme deux fois l'Allemagne, formant sur « l'Arc de déforestation » le plus grand bassin d'élevage au monde. L'élevage, conduit dans des systèmes très extensifs, s'est en effet révélé particulièrement adapté à la conquête de territoires en situation de front pionnier. Bien qu'exotiques, les graminées du genre *Brachiaria* et la race zébu Nelore se sont très bien adaptées à l'écologie amazonienne, et les migrants ont ainsi pu, avec très peu de main-d'œuvre, ouvrir des fermes d'élevage et les étendre avec le feu comme principal outil. S'approprier la terre étant l'objectif premier des migrants, l'élevage s'est vite démocratisé, sortant du cadre classique des grandes exploitations et diffusant jusque dans les exploitations familiales qui se sont pour certaines mises à produire du lait (Poccard-Chapuis, 2004). Mais les pratiques d'élevage simplifiées à l'extrême, privilégiant l'expansion plutôt que la gestion des pâturages, ont causé d'importants gaspillages de ressources naturelles, notamment de matières organiques accumulées dans les sols par les écosystèmes forestiers. À partir de 2005, les pouvoirs publics ont instauré un arsenal de mesures répressives pour empêcher de nouvelles déforestations. La logique foncière qui gouvernait jusque-là

les systèmes d'élevage a ainsi été stoppée, à l'exception de l'avant des fronts pionniers où la déforestation se poursuit dans l'illégalité.

Une nouvelle phase d'adaptations a alors débuté, partant d'un foncier désormais limité, de sols dégradés, de bagages techniques devenus inadaptés chez la plupart des éleveurs. Le pâturage est au cœur de la transition : il ne s'agit plus simplement d'étouffer les graines d'espèces ligneuses pour empêcher le retour de la forêt, mais d'assurer une offre fourragère optimisée, valorisant la pluviométrie et l'insolation du climat équatorial. C'est bien la production animale qui doit assurer des revenus, et non plus la fonction patrimoniale. Cela suppose de gérer la fertilité des sols : le pâturage tournant est la technique la plus accessible, l'intégration d'une culture annuelle de maïs ou sorgho en rotation avec la prairie n'étant pas possible dans toutes les régions, ni pour tous les agriculteurs du fait du coût élevé de la mécanisation et des intrants (Burlamaqui, 2015).

Mais derrière ce changement technique, c'est tout le paysage qui change, et tout le territoire qui doit se mobiliser pour conduire cette transition. Car les éleveurs, en investissant plus de ressources, de travail et de connaissances dans leurs pâturages, tendent à se concentrer sur leurs meilleures terres, laissant les moins aptes retourner à la forêt. Une nouvelle trame forestière se constitue, plus performante pour produire des services car occupant les zones de pentes et zones humides, formant des couloirs qui connectent les blocs forestiers (Pinillos, 2021a). Dans des conditions devenues plus sèches du fait de la réduction du couvert forestier, le feu d'origine accidentelle ou encore utilisé par certains dans une logique foncière ou à des fins de mise en culture menace les investissements consentis, et les acteurs territoriaux doivent s'organiser pour le maîtriser. Pour accélérer et contrôler ces processus à large échelle, des plans de restauration des paysages basés sur l'aptitude des sols sont élaborés par les mairies comme au long de la route Belém-Brasilia, où a commencé le premier front pionner d'Amazonie. Des systèmes de suivi des performances environnementales voient le jour, pour que les groupes de producteurs et les filières puissent attester de leurs progrès, et ainsi organiser des chaînes de valeur ou drainer des investissements responsables.

Après avoir assuré une fonction foncière, désastreuse sur le plan environnemental du fait de son impact sur la forêt et les sols, une intensification de l'élevage amazonien est donc en cours. Que cette intensification soit agroécologique (pâturage tournant, légumineuses, arbres fourragers) ou relève de la révolution verte (engrais, herbicides, mécanisation), elle est mise en œuvre par les jeunes éleveurs et marque un basculement de générations. La valorisation foncière qui en résulte peut, comme ce fut le cas ailleurs en Amérique Latine, profiter aux plus offrants, et voir les pâturages être remplacés par des plantations de soja, d'eucalyptus ou de palmier à huile, là où les sols et les infrastructures de transport favorisent ces cultures (Osis, 2019).

Maghreb : un élevage de moins en moins pastoral, une mobilité réinventée

Le pastoralisme au Maghreb était adapté aux contraintes biophysiques. Il a connu des fluctuations depuis l'époque romaine. Cet élevage extensif se pratiquait par des familles

ayant des petits ruminants broutant une modeste végétation, mais suffisante pour fournir lait, viande, peaux, laine. L'écosystème pâturé se maintenait grâce à la mobilité des familles vivant sous la tente (la *khaïma*, la *guitoun*e).

Dès les années 1950/60, plusieurs facteurs ont impacté ce pastoralisme : la démographie (32 millions d'habitants en 1960 et 93 millions en 2020), le développement des cultures sur les anciennes terres de parcours, l'évolution des accès aux ressources (lois foncières, usages coutumiers des *Arch* (Bessaoud, 2013)) et des sécheresses pluriannuelles (OSS, 2008). Lors de sécheresses très marquées (1970/1980), les États ont commencé à fournir de l'orge en grain pour partie importé et subventionné pour nourrir les animaux. Une fois cette pratique maîtrisée, les cheptels ont augmenté. Le cheptel ovin est ainsi passé de 10 millions en 1960 à 57 millions en 2018 (FAOSTAT) pour 62 millions d'hectares de parcours (¾ entre les isohyètes 100 à 400 $mm \cdot an^{-1}$). La productivité pastorale, sous les effets conjoints des sécheresses et de l'intense exploitation, a chuté de 60 % (Mahyou *et al.*, 2018), comme l'avait prévu Le Houérou en 1995.

La culture d'orge se trouve au centre des stratégies des éleveurs. Ils en sèment chaque année. Si la pluviométrie est satisfaisante, le grain est utilisé pour les animaux. Elle permet aussi le pâturage précoce des céréales (déprimage). Après la moisson, les chaumes sont des pâtures appréciées (qui peuvent se louer cher) et à l'automne, les repousses sont pâturées. Les années à fort déficit pluviométrique, la culture d'orge est utilisée comme pâture (l'orge sinistrée). Dans ces systèmes d'élevage, la couverture alimentaire des animaux par les pâturages naturels est inférieure à 35 %, voire à 10 % en Tunisie centrale (Jemaa *et al.*, 2016). Les différentes pâtures offertes par l'orge et l'apport de foin représentent 25 % des besoins, les 40 % restant sont couverts par l'apport de concentré (Hadbaoui *et al.*, 2020). Même si sa contribution à l'alimentation est faible, la pratique de la transhumance se maintient chez les éleveurs pouvant avoir recours à des camions, des espaces d'accueil (le plus souvent payants) et des bergers (membres de la famille ou salariés). En conséquence, les éleveurs transhumants possèdent au moins deux cents brebis. Les éleveurs à plus faible effectif accèdent à des terres à pâturer aux alentours du terroir d'attache (chaumes, orge sinistrée, jachère) et doivent maintenir des apports en concentré constants. Ces terres pâturées sont soit louées, soit gratuites pour les éleveurs-bergers qui gardent des animaux appartenant à un ou des propriétaires travaillant hors de l'agriculture. Les circuits de transhumance dépendent des pluies et s'organisent grâce aux téléphones et aux camions. Les pasteurs prennent des orientations plus variées qu'auparavant et changent d'une année sur l'autre selon la pluviométrie des régions et le prix des locations des terres à pâturer (Gaci *et al.*, 2021). Les pâtures de transhumance en été (chaume, parcours naturel) sont pour les éleveurs des kilogrammes de grain économisés (l'apport en concentré passe en moyenne de 600 à 300 g par jour et par tête).

Soutenu par une demande importante, en particulier lors des fêtes religieuses, et peu concurrencé par les importations qui sont fortement taxées (200 à 300 % selon les pays), le prix de la viande ovine est élevé. Sous réserve de disposer d'un certain nombre d'animaux et d'accéder à suffisamment de pâturages et d'orge pour faire face aux variations

des conditions climatiques, l'élevage assure ainsi un revenu. Les pasteurs sont devenus des agropasteurs, voire des agriculteurs-éleveurs. Cette adaptation vulnérabilise à terme l'élevage, car la culture sur des terres fragiles et la surcharge des parcours favorisent la désertification. Depuis 1980, 11 millions d'hectares de parcours ont ainsi été mis en culture, menaçant de désertification les terres voisines par l'ensablement, et 14 millions d'hectares de la zone steppique sont concernés par la désertification (Bencherif, 2018 ; Snaibi et Mezrhab, 2021 ; Abaab *et al.*, 2020).

Analyse transversale

Les cas exposés dans cette partie témoignent d'adaptations continues et importantes des élevages dans les territoires. Au cours des dernières décennies, les élevages des régions étudiées ont ainsi changé de *taille* (agrandissement en France), de *forme* (fermes familiales *vs* grands domaines d'élevage au Brésil, recrutement de bergers salariés au Maghreb), de *production* (passage de l'élevage allaitant à l'élevage laitier au Brésil, mouvement inverse en France), mais aussi de *pratiques*. En France et au Maghreb, la contribution du pâturage à l'alimentation des troupeaux a fortement régressé, remplacée par des fourrages désormais cultivés sur l'exploitation et par des concentrés achetés. Au Brésil, dans les fermes familiales qui ont développé l'élevage, le pâturage est géré de manière plus intensive : il est devenu tournant et entre parfois en rotation avec une culture annuelle de maïs ou de sorgho. Face à la prédation par les loups, les éleveurs et bergers de France ont tenté d'adapter leurs pratiques, en particulier sur les estives de montagne (encadré 2.1). Enfin, les territoires et les opérateurs des filières – ici, les minilaiteries – s'adaptent eux aussi, développant leur collecte locale auprès de noyaux d'éleveurs qu'ils contribuent à sédentariser et chez qui ils favorisent une intensification des pratiques (encadré 2.2).

Les déterminants de ces adaptations sont divers et opèrent à différentes échelles. Les *politiques publiques*, et leur impact sur le prix des produits et des intrants, ont joué un rôle majeur en France (crédit, politique de prix, subventions qui les ont remplacées) mais aussi au Maghreb via le prix des concentrés qui a dans certains cas été subventionné et celui de la viande ovine dont les importations sont taxées. Le caractère obligatoire d'un minimum de collecte locale pour pouvoir opérer dans le pays imposé en Afrique de l'Ouest est un autre exemple de l'influence des choix politiques nationaux ou supranationaux. Dans deux des régions étudiées, les *régulations foncières* ont également joué un rôle, que ce soit en contrôlant la déforestation à partir de 2005 au Brésil ou en permettant l'appropriation privée d'espaces de culture et en transformant ainsi l'espace pastoral en un espace agropastoral au Maghreb. À une échelle plus locale, les *transformations des écosystèmes* ont également été à l'origine de certaines adaptations, qu'il s'agisse de la fermeture des milieux (France), du développement rapide des adventices sur les prairies gagnées sur la forêt (Brésil), du changement climatique réduisant la productivité des pâturages (Maghreb) ou encore du retour d'un prédateur comme le loup en France. La *démographie* humaine, l'équilibre entre les générations au sein de la population locale et son investissement plus ou moins poussé dans des activités non-agricoles

Encadré 2.1. Quand l'adaptation ne suffit plus : les éleveurs face aux loups en France.

Michel Meuret, Marie-Odile Nozières-Petit, Charles-Henri Moulin

Pour des raisons de sécurité envers les humains et de dégâts aux élevages, les loups avaient été éradiqués en France à la fin du XIX[e] et au début du XX[e] siècle. Il n'y en avait donc plus lorsque le pays s'est engagé en 1992, dans le cadre de la directive Habitats de l'UE, à contribuer à la restauration de l'espèce placée sous statut de protection.

La présence de loups arrivés en France depuis l'Italie n'a été rendue publique qu'en 1993. L'arrivée n'ayant pas été anticipée, les éleveurs n'étaient aucunement préparés à s'y confronter. Ceci au contraire d'autres régions du monde, tel le nord-ouest des États-Unis, où toutes les parties susceptibles d'être concernées par le programme de restauration des loups, à commencer par les éleveurs et les chasseurs, avaient été conviées à négocier durant 10 ans avant les premiers lâchers (Meuret et Osty, 2015).

En près de 30 ans, les éleveurs des régions françaises investies par des loups ont tenté de s'adapter face à cette nouvelle contrainte, aussitôt que des contrats et des aides financières leur ont permis d'adopter les mesures de protection préconisées : présence humaine renforcée, chiens de protection, clôtures sécurisées, retour systématique en enclos de nuit ou en bergerie. Aujourd'hui, dans les Alpes et en Provence, l'adoption de ces mesures est généralisée, matérialisant l'effort d'adaptation des éleveurs, le nombre de contrats de protection des éleveurs correspondant étroitement au nombre d'unités pastorales, surtout sur les alpages (Meuret *et al.* 2017). Les conséquences en retour sont pourtant parfois néfastes : cohabitation difficile avec un aide-berger dans des cabanes d'alpage exiguës ; conflits avec des randonneurs en raison des chiens de protection ; conflits avec des chasseurs liés au rehaussement et à l'électrification des clôtures ; déplacements biquotidiens vers et depuis l'enclos de nuit qui déstructurent les circuits de bergers et génèrent aussi de l'érosion des sols et des dégâts aux pelouses.

Si éleveurs et bergers se sont peu à peu adaptés, la plupart vivent un grand mal-être au travail, lié aux conséquences directes et indirectes des attaques. Outre les animaux morts, on recense également des pertes d'état corporel, des avortements parfois en masse, ainsi que des chutes de productions liées au stress généré (Meuret *et al.* 2017). La progression constante et d'allure linéaire du nombre annuel de victimes des loups : + 1 000 animaux tués ou mortellement blessés par an entre 2009 et 2019 en France (Meuret *et al.*, 2020), avec un total en 2019 de près de 15 000 victimes (toutes espèces d'animaux, ceux retrouvés mais aussi ceux disparus à la suite des attaques) montre le peu de fruits des efforts de mise en œuvre de la protection des troupeaux.

Les capacités d'adaptation des loups, carnivores très intelligents et opportunistes, n'ont pas ou alors trop insuffisamment été anticipées. Les loups apprennent à contourner les obstacles mis en place par les éleveurs, surtout en l'absence de conséquences graves pour eux et leur progéniture. C'est une dynamique de *coadaptation* entre humains et prédateurs, processus en constante évolution, qu'il aurait été bien plus judicieux de considérer (Meuret *et al.* 2020).

locales ou plus lointaines ont eux-aussi suscité des adaptations (exemple des néoruraux dans les Cévennes, de la gestion depuis la ville de certains grands troupeaux pastoraux par des notables au Maghreb, du flux migratoire pionnier et des aspirations différentes de leurs descendants en Amazonie). Enfin, l'évolution de la *demande de produits animaux*, qu'elle s'exprime localement ou à l'échelle nationale, a elle aussi joué un rôle, incitant les élevages familiaux à produire du lait en Amazonie, favorisant le développement de la transformation et de la vente en circuits courts en France et stimulant la collecte de lait local en Afrique de l'Ouest.

Encadré 2.2. Adaptation des laiteries industrielles aux petits producteurs ouest-africains.

Christian Corniaux, Guillaume Duteurtre

Collecter du lait en Afrique de l'Ouest coûte cher. La dispersion et la faible productivité des élevages pastoraux entraînent un renchérissement de l'ordre de 100 francs CFA par litre de lait collecté, soit le tiers du prix arrivé « bord quai » à la laiterie. La concurrence avec le lait en poudre importé, notamment d'Europe, est ainsi exacerbée sur un marché dominé par des consommateurs urbains à faible pouvoir d'achat. Les industriels laitiers, situés dans les capitales, privilégient cette poudre bon marché. Sur une centaine d'entreprises, seule une vingtaine collectent du lait. Parfois contraintes par des mesures nationales coercitives (quota obligatoire), elles voient aussi dans cette collecte de lait local un axe pour leurs actions de responsabilité sociale des entreprises (RSE) et un moyen de valoriser leurs produits sur quelques marchés de niche rémunérateurs.

Dès lors, ces entreprises s'adaptent aux conditions des éleveurs pour les encourager à produire et à leur vendre leur lait (Corniaux, 2019). Le principal levier est celui du prix, maintenu relativement haut toute l'année. Le second est celui de la fourniture d'aliments contre du lait. Un gros effort est également consenti par les laiteries pour dimensionner les moyens logistiques. Enfin elles soutiennent, souvent avec l'appui de programmes de développement, l'installation complémentaire et progressive aux noyaux laitiers pastoraux sédentarisés de minifermes laitières intensifiées. Le coût de la collecte diminue alors de façon sensible, rendant plus rentable la transformation du lait local.

Force est de constater que ces trajectoires d'adaptation, désormais expliquées, ne vont pas systématiquement dans le sens d'un développement durable des territoires étudiés. Ainsi, la réduction de la contribution du pâturage à l'alimentation des animaux observée en France et au Maghreb est contraire aux principes de l'agroécologie : elle limite l'autonomie énergétique et alimentaire des exploitations et contribue à l'enfrichement et la fermeture du paysage en France. Par ailleurs, toutes les exploitations ne sont pas toujours en mesure de s'adapter et ces trajectoires laissent ainsi de côté une partie des élevages : dans les Causses et Cévennes, les exploitations faiblement dotées en terres faciles à motomécaniser se sont trouvées désavantagées pour mobiliser ces nouveaux

moyens et ont eu tendance à disparaître ; au Maghreb, les fermes équipées de camion et à même d'embaucher de la main-d'œuvre salariée peuvent explorer des espaces de pâturage plus lointains et ainsi nourrir des troupeaux plus grands avec plus de sécurité face aux aléas ; en Afrique de l'Ouest, les élevages à plus forte composante pastorale, très mobiles, accèdent difficilement aux circuits de collecte du lait des minilaiteries et doivent donc trouver des valorisations alternatives pour leur lait. Enfin, l'adaptation à la prédation en France génère un stress intense chez les éleveurs.

Étudier les trajectoires d'adaptation et leurs déterminants apparaît ainsi essentiel pour identifier les leviers à même de faire évoluer les activités d'élevage dans le sens d'un développement durable. Rendue possible par la mobilisation (ou même la construction) de cadres d'analyse et dispositifs de recherche adaptés, la comparaison entre territoires proches (Causses et Cévennes par exemple) ou plus lointains (France et Amérique du Nord sur la prédation) s'avère souvent fructueuse. De telles recherches permettent de mettre en évidence et de raisonner des leviers divers, portant par exemple sur les modalités de subventions de la politique agricole commune (PAC) et les choix collectifs faits dans les démarches qualité Roquefort ou Pélardon dans les Causses et Cévennes, sur la responsabilité sociale des entreprises et les politiques laitières en Afrique de l'Ouest, ou encore sur les régulations foncières au Brésil et au Maghreb.


Conclusion

Claire Aubron, Christian Corniaux, Laurence Flori

Plusieurs enseignements sur l'adaptation en élevage peuvent être tirés des travaux présentés dans ce chapitre.

Tout d'abord, même si c'est là un résultat trivial pour tout observateur attentif des pratiques et du monde de l'élevage, les systèmes d'élevage au pâturage s'adaptent et se transforment continuellement. Ils sont en cela bien éloignés du caractère archaïque et immuable qu'on leur prête parfois. Face à l'évolution du climat, à la variation des disponibilités fourragères, à la présence de maladies, au changement des conditions de prix, à l'arrivée d'un prédateur, à l'émergence d'une demande pour des produits animaux nouveaux, à une rupture politique majeure, des processus d'adaptation sont en effet observés dans ces élevages, qui apparaissent de ce fait plus proches du mouvement permanent que de l'immobilisme. Ceci suggère que s'intéresser aux capacités d'adaptation des animaux, des élevages ou des filières par exemple est tout aussi important que d'évaluer leur productivité.

En second lieu, il apparaît que ces adaptations s'appuient sur une multiplicité de leviers. Ces leviers sont de différentes natures (physiologique, génétique, technique, organisationnelle, sociale, etc.) et opèrent à différentes échelles (animal, ferme, paysage, collectif d'éleveurs, etc.) et sur différents pas de temps (court, moyen ou long terme). Bon nombre de ces leviers sont par ailleurs interdépendants, ce qui rend les processus d'adaptation

particulièrement complexes. La prise en compte de cette diversité de leviers dans la recherche comme dans l'accompagnement du développement de l'élevage apparaît cruciale, ce qui milite à la fois pour la production de connaissances sur chacun de ces leviers et pour leur intégration au moyen d'approches pluridisciplinaires et systémiques. De tels travaux mettent en lumière des éléments clés qui permettent de préserver, voire d'augmenter, les capacités d'adaptation des élevages, tels que la diversité génétique ou les collectifs d'éleveurs abordés dans les sous-chapitres consacrés à la *diversité génétique et adaptation des races locales à leur milieu d'élevage* (p. 52), aux *mécanismes d'adaptation analysés à l'échelle des familles et des collectifs locaux* (p. 63) ainsi qu'aux *trajectoires d'adaptation des élevages dans les territoires* (p. 73).

Le fait qu'adaptation ne soit pas toujours synonyme de développement durable constitue un troisième enseignement de ce chapitre. En effet, l'adaptation s'accompagne parfois de l'exclusion, de la fragilisation ou de la disparition de certaines entités auparavant constitutives de l'élevage d'une région. Les animaux, les paysages, les pratiques et les formes d'élevage sélectionnés du fait de ces processus d'adaptation multiples et enchevêtrés ne sont pas forcément ceux répondant le mieux aux objectifs de développement durable. Ce constat souligne qu'au-delà de la prise en compte de l'adaptation dans la recherche et l'accompagnement du développement de l'élevage, il y a un enjeu majeur à piloter et à gérer ces processus d'adaptation dans le sens d'un développement plus durable. La production de connaissances intégrées (pluridisciplinaires et pluriacteurs) et situées, l'action publique et l'action collective semblent des éléments clés pour relever ce défi.

Enfin, en poussant un peu plus loin encore la réflexion sur les limites du concept d'adaptation, on peut s'interroger sur la capacité de ces adaptations de l'élevage, aussi nombreuses et articulées sont-elles, à répondre aux enjeux sociaux et environnementaux contemporains. Comme le soulignent les auteurs travaillant sur l'histoire de l'utilisation de l'énergie et de la biomasse par les sociétés (régimes sociométaboliques), la transition vers une agriculture agroécologique que tant d'institutions appellent aujourd'hui de leurs vœux n'exige-t-elle pas des changements plus profonds, de même ampleur que pour la révolution agricole néolithique ou pour la révolution industrielle (Haberl *et al.*, 2011) ? Aux côtés de l'étude des adaptations de l'élevage et de leur pilotage, travailler à l'analyse, la conception et l'accompagnement d'innovations et de ruptures dans les pratiques, sociétés et politiques agricoles apparaît ainsi nécessaire.

3. La recherche d'efficience, une démarche pour accroître la contribution de l'élevage au développement durable des territoires

Jonathan Vayssières, Fabien Stark, Vincent Blanfort, René Poccard-Chapuis, Mathieu Vigne

Introduction : l'efficience, d'un simple ratio à un cadre d'analyse opérationnel pour appuyer le développement durable des systèmes d'élevage

Le concept d'efficience a souvent été mobilisé comme un cadre d'analyse pertinent pour penser l'évolution du secteur de l'élevage et accompagner ses transitions. La polysémie de ce concept a cependant induit une certaine confusion. Or, une analyse historique de sa mobilisation pour l'évaluation des systèmes d'élevage montre que l'évolution sémantique observée est surtout la conséquence d'une évolution épistémologique c'est-à-dire des connaissances sur lesquelles le concept se fonde, et axiologique, c'est-à-dire des valeurs portées par le concept. Ces évolutions ont ainsi abouti à des définitions multiples en réponse à la complexité des enjeux auxquels le secteur a été et est encore confronté.

Produire plus : l'efficience technico-économique pour répondre aux enjeux de la révolution verte

Dans la vision productiviste de la révolution verte, les indicateurs d'efficience ont d'abord été mobilisés pour maximiser l'utilisation des intrants agricoles afin de dégager le maximum de produits et donc de revenus par unité structurelle (par exemple kilogrammes de blé par hectare ou litres de lait par vache). C'est donc l'efficience technico-économique des systèmes d'élevage qui était au centre de l'évaluation de leurs performances. Celle-ci s'exprimait selon un ratio entre les produits et les moyens de production mis en œuvre, au même titre que la productivité ou le rendement.

Efficience technico-économique = Produit(s) / Moyen(s) de production mis en œuvre

Parmi les indicateurs largement utilisés, on peut citer par exemple les quintaux de blé par hectare pour les productions végétales ou les litres de lait par femelle par cycle de production pour les productions animales.

Produire mieux : l'efficience pour une gestion plus sobre des ressources énergétiques

Depuis une quarantaine d'années maintenant, le concept d'efficience semble toutefois trouver une stabilité sémantique avec une définition qui lui est propre. L'*efficience* (*efficiency*) est ainsi largement considérée comme la recherche d'un meilleur usage d'une ou des ressources naturelles mises en œuvre pour parvenir à un ou des résultats. Elle s'exprime comme le rapport entre le(s) résultat(s) obtenu(s) (produits ou services) et la (ou les) ressource(s) naturelle(s) mobilisée(s).

Efficience = Résultat(s) obtenu(s) / Ressource(s) naturelle(s) mise(s) en œuvre

Cette évolution sémantique permet de concevoir d'autres formes d'efficience que la seule efficience technico-économique, comme l'efficience environnementale, et donc de sortir d'une logique purement productiviste. L'efficience ainsi redéfinie se distingue aussi en cela de l'*efficacité* (*efficacy*) qui est le rapport entre les résultats obtenus et les objectifs fixés, sans prise en compte des moyens mis en œuvre pour atteindre ces résultats.

Efficacité = Résultat(s) obtenu(s) / Objectif(s) visé(s)

Toutefois, cet intérêt pour les ressources naturelles, en comparaison de l'efficience technico-économique précédemment exposée, n'a pas été motivé initialement par la perception de la finitude de ce type de ressource du fait d'un rythme d'exploitation trop élevée mais plutôt par l'augmentation de leur coût. En effet, la hausse du prix du pétrole durant les chocs pétroliers de 1973 et 1979 incita le secteur agricole à réduire ses consommations d'énergie fossile directes et indirectes, principalement dans un objectif économique. C'est ainsi que les indicateurs d'efficience en agriculture connurent un essor au travers de l'évaluation de l'efficience énergétique fossile des systèmes agricoles qui vinrent compléter les mesures de performances technico-économiques précédemment citées. Celle-ci est le plus souvent exprimée en mégajoule d'énergie calorifique contenue dans les produits agricoles sur les mégajoules d'énergie fossile consommée directement et indirectement par le système de production.

Produire durablement: efficience et prise de conscience environnementale

Dans les années 1980, peu d'analyses de l'efficience énergétique fossile sont recensées, du fait d'une diminution importante du prix de l'énergie fossile liée à une offre croissante d'autres pays producteurs que ceux du Golfe. Mais celles-ci connaissent à nouveau un essor au début des années 1990 (Vigne *et al.*, 2012). La dépendance aux ressources

énergétiques fossiles n'est plus seulement analysée au regard de son impact sur les performances économiques des systèmes mais en considérant l'enjeu prégnant du réchauffement climatique mis en lumière par le rapport Brundtland de 1987 et la conférence de Rio de 1992. C'est maintenant le lien majeur entre consommation d'énergie fossile et impact sur le réchauffement climatique des émissions de dioxyde de carbone (CO_2) qui motive ce regain d'attention.

Par ailleurs, l'évolution des enjeux environnementaux élargit l'éventail des ressources prises en compte dans le rapport d'efficience. Bien qu'elle soit toujours étudiée (Vigne *et al.*, 2012), l'énergie fossile est complétée par la prise en compte d'autres ressources telles que l'eau, l'azote, le phosphore ou encore les surfaces arables. La capacité des systèmes d'élevage à utiliser de manière modérée pour toute ou partie ces ressources s'inscrit ainsi dans une recherche plus globale d'efficience environnementale.

De plus, le questionnement majeur autour des émissions de gaz à effet de serre (GES) entraîne une nouvelle évolution dans le concept d'efficience environnementale. Le secteur de l'élevage est particulièrement ciblé compte tenu de son importante contribution à ce phénomène via ses émissions de GES (Steinfeld *et al.*, 2006 ; Gerber *et al.*, 2013). Il ne s'agit plus seulement de diminuer la consommation de ressources par unité de produit, mais de considérer le rapport entre deux types de produits de l'activité : des produits indésirables, souvent des flux entraînant des pollutions environnementales (pertes d'azote ou émissions de gaz à effet de serre par exemple) et des produits désirés.

Inefficience environnementale = Produit(s) indésirable(s) / Produit(s) visé(s)

C'est donc maintenant l'inefficience environnementale des activités d'élevage qui est évaluée et qui témoigne de ses impacts environnementaux. Ces impacts sont donc réduits lorsque le ratio, exprimé par exemple en kilogramme d'équivalent CO_2 par litre de lait ou gramme de viande, diminue.

Mais comment ces indicateurs sont-ils mobilisés dans les travaux de recherche et développement pour traduire la contribution des systèmes d'élevage aux grands enjeux environnementaux actuels ? Le sous-chapitre *L'efficience pour rendre compte de la complexité des contributions des systèmes d'élevage au pâturage au changement climatique* (p. 86) illustre la pertinence de ces indicateurs sur deux enjeux où la notion d'efficience est intuitivement pertinente, à savoir la gestion sobre des ressources énergétiques et la réduction de la contribution de l'élevage au changement climatique.

L'efficience pour une analyse systémique des transitions de l'élevage

La polysémie du concept d'efficience ainsi que la diversité d'indicateurs mis en lumière précédemment pourraient apparaître comme un frein à la mobilisation du concept d'efficience pour l'action. En effet, il ne s'agit pas d'évaluer pour évaluer, mais bien d'évaluer afin de mieux accompagner le changement. S'y ajoutent des questionnements liés aux échelles d'évaluation. L'amélioration de l'efficience des processus à l'échelle de l'animal



ou de la parcelle ne permet pas nécessairement de maximiser les bénéfices à l'échelle de l'exploitation voire du territoire. Ce que l'on observe à un niveau d'organisation n'est pas nécessairement observé aux niveaux d'organisation supérieurs. Ainsi, les analyses territoriales ne peuvent être basées sur une simple agrégation des « performances » à l'échelle des exploitations. Par ailleurs, considérer les niveaux d'organisation des filières et des territoires nécessite de prendre en compte une diversité de processus et d'acteurs qui dépasse les seuls systèmes d'élevage.

L'ensemble de ces considérations pose une question d'opérationnalité : comment les indicateurs et les méthodes d'évaluation de l'efficience peuvent-ils être mobilisés pour accompagner les transitions des systèmes d'élevage aux différents niveaux d'organisation ? Pour éclairer cette question, Le sous-chapitre *La recherche d'efficience pour accompagner la transition agroécologique des systèmes d'élevage* (p. 104) propose des travaux de recherche ayant mobilisé le concept d'efficience pour accompagner les transitions des systèmes d'élevage vers des systèmes agroécologiques plus durables.

Pour une prise en compte des multiples services offerts par l'élevage ?

Malgré la diversité des dimensions qu'ils prennent en considération (gamme de ressources mobilisées, gamme de produits souhaités et gamme de produits non souhaitables), les indicateurs d'efficience peuvent-ils être aussi mobilisés dans des approches multicritères, notamment dans le but de répondre à l'ensemble des enjeux du développement durable auxquels le secteur de l'élevage est confronté ? En effet, si les systèmes d'élevage se doivent d'être efficients d'un point de vue technique, économique et environnemental, les indicateurs d'efficience se doivent également d'informer des dimensions sociales qui deviennent de plus en plus prégnantes.

Par ailleurs, dans les études menées, les produits considérés dans les indicateurs d'efficience se résument bien souvent aux produits à destination de l'alimentation humaine (lait et viande). Or, la multifonctionnalité des productions animales et végétales questionne la quantification des produits et services rendus par l'élevage. La finalité productive de l'élevage est revisitée. Il ne s'agit plus seulement d'assurer la sécurité alimentaire des populations humaines mais également de considérer ses multiples services, qu'ils soient socio-économiques ou écosystémiques (*Millennium Ecosystem Assessment*, 2005 ; Dumont *et al.*, 2019).

Dans les pays du Sud par exemple, si les systèmes d'élevage sont moins productifs qu'au nord par animal et par hectare en matière de produits à destination de l'alimentation humaine, ils assurent un ensemble de services techniques et socio-économiques importants, dont la constitution d'un capital économique sur pied facilement mobilisable, le positionnement social, le maintien d'un tissu social et économique en zone rurale ou encore la production de fumure organique ou la traction animale (Alary *et al.*, 2011). Les services écosystémiques apportés par l'élevage comme les transferts de fertilité et la

séquestration de carbone dans les sols (Blanfort *et al.*, 2011) ou la contribution du pastoralisme à l'équilibre et à la durabilité des écosystèmes des zones sèches sont d'autres exemples emblématiques. Le pastoralisme a, en effet, en fonction des modes de conduite et des écosystèmes, la capacité d'ouvrir les paysages et limiter l'embroussaillement, de stimuler la croissance végétale, de fertiliser les sols, d'accélérer le recyclage des nutriments, de participer à la dissémination des graines ou encore d'améliorer l'infiltration des eaux de pluie, et ce sur de vastes territoires dans lesquels il constitue la principale activité économique.

Considérant les indicateurs d'efficience déjà construits, mais également ceux à construire, Le sous-chapitre *Évaluation multicritère de l'efficience pour rendre compte de la multifonctionnalité des systèmes d'élevage au pâturage* (p. 120) propose une réflexion sur l'apport du concept d'efficience pour mieux prendre en compte la contribution du secteur de l'élevage aux ODD. Ce chapitre permet notamment d'analyser comment ces objectifs mondiaux définis par les Nations unies peuvent intégrer la multifonctionnalité des systèmes d'élevage, mais également la multiplicité des enjeux locaux et globaux, notamment par l'utilisation des approches d'évaluation multicritère et par la construction des compromis que les acteurs doivent et devront faire.

L'efficience pour rendre compte de la complexité des contributions des systèmes d'élevage au pâturage au changement climatique

Vincent Blanfort, Habibou Assouma, Bérénice Bois, Louis-Axel Édouard-Rambaut, Jonathan Vayssières, Mathieu Vigne

Le débat « élevage/environnement» alimente depuis plusieurs décennies les questionnements sur le développement de l'agriculture, confrontée aux changements globaux. Ce débat sociétal s'est beaucoup polarisé sur les impacts négatifs de l'élevage (Steinfeld *et al.*, 2006) et notamment sur sa contribution au dérèglement climatique. En effet, le secteur de l'élevage est responsable de 14,5 % des émissions de GES anthropiques (total pour l'agriculture : 23 %). Elles sont essentiellement dues aux ruminants avec 65 % attribués aux bovins lait et viande et 6,5 % aux petits ruminants. Mais les ruminants en systèmes d'élevage à l'herbe ne seraient responsables « que » de 20 % des émissions totales de l'élevage (Gerber *et al.*, 2013).

Par ailleurs, le rapport spécial du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) de 2019 « sur le changement climatique et les terres émergées » fait état de scénarios d'évolution bien plus préoccupants que les précédents sur les impacts du changement climatique et l'adaptation nécessaire, notamment en matière de désertification, de dégradation et de gestion durable des terres ainsi que de sécurité alimentaire. Or l'élevage à l'herbe fait aussi partie des leviers possibles pour réduire les émissions. Ces éléments montrent que mesurer le poids de l'élevage au pâturage dans les changements

globaux est une tâche complexe. Cette complexité nous impose de mettre en œuvre des méthodes d'évaluation adaptées, pour établir correctement les bilans GES (le dioxyde de carbone – CO_2 –, le méthane – CH_4 – et le protoxyde d'azote – N_2O). Ces bilans sont indispensables pour concevoir de façon opérationnelle, pour chaque situation, les deux grands types d'actions d'atténuation : (i) diminuer le niveau des émissions de GES et (ii) favoriser le transfert et le stockage de carbone (C) depuis l'atmosphère vers des compartiments terrestres sous forme stabilisée.

Dans cette section, nous illustrons concrètement ce chantier méthodologique, avec des programmes de recherche mis en œuvre dans diverses régions tropicales, où sont conduits des systèmes d'élevage au pâturage très contrastés. Nous proposons des indicateurs basés sur le concept d'efficience pour mieux traduire les contributions spécifiques de ces systèmes aux enjeux globaux et notamment à ceux liés au climat. Ces indicateurs contribuent à améliorer la vision souvent stéréotypée des impacts du secteur de l'élevage en général, et des systèmes d'élevage au pâturage en particulier (Blanfort *et al.*, 2015b). Pour autant, il ne s'agit pas de nier ces impacts avérés, mais d'en préciser les limites et les conditions, par des méthodes intégratives ciblées sur les processus et leurs conséquences. Ces méthodes concilient de façon intégrée (i) des métriques adaptées au contexte, (ii) la prise en compte des niveaux d'organisation et leur imbrication (animal, troupeau, parcelle, territoire) ainsi que (iii) les caractéristiques des acteurs qui interviennent à chaque niveau (éleveurs, appui technique, gestionnaire du territoire).

Les émissions de méthane entérique à l'échelle de l'animal et du troupeau sont-elles plus élevées dans les systèmes d'élevage au pâturage au Sud ?

Bien que les ruminants soient dotés de cette capacité à transformer la cellulose en particulier en protéines de qualité, les processus de dégradation biochimique et digestion des fourrages produisent des résidus. Ils entraînent notamment la production de méthane (CH_4) sous forme gazeuse, conséquence de la dégradation dans le rumen des parois membranaires composées de cellulose, hémicellulose et lignine.

Les systèmes d'élevage au pâturage (SEP) des zones tropicales et méditerranéennes se trouvent particulièrement mis en cause dans ce débat sur les émissions de méthane par les bovins : le ratio production animale / émission de méthane est très défavorable, en comparaison des systèmes d'élevage plus intensifs des pays industrialisés. Selon la FAO (Gerber *et al.*, 2013), la moyenne mondiale d'émission de GES en élevage bovin est de 46,2 kg éq CO_2/kg carcasse[12] pour la viande et de 2,8 kg éq CO_2/kg pour le lait. Ces chiffres sont différents si l'on ne considère que l'Afrique subsaharienne, l'Amérique latine et l'Asie du Sud : 70 kg éq CO_2 y sont émis pour la production d'un kilogramme de carcasse et de 2 à 12 kg éq CO_2 pour un kilogramme de lait suivant la productivité des vaches

12. L'« équivalent CO_2 » (éq CO_2 ou *CO_2 eq* en anglais) est une unité créée par le Giec pour comparer les impacts des différents GES en matière de réchauffement climatique et pouvoir cumuler leurs émissions.



(qui est très variable). Ces chiffres sont essentiellement imputables aux émissions de méthane entérique. Établis sur des ratios par animal ou par kilogramme de produits, ils traduisent surtout la plus faible digestibilité des aliments et la productivité plus limitée des animaux dans la plupart des systèmes d'élevage des pays en développement des zones chaudes en particulier. Les enjeux pour l'atténuation n'en sont que plus évidents.

Au Nord et notamment sur le territoire français métropolitain, les institutions de recherche et d'appui à l'élevage se sont largement emparées de ces chiffres. Le potentiel d'atténuation pourrait atteindre 30 % des niveaux d'émissions actuels. Mais dans les Suds, les alternatives envisageables sont nettement moins documentées. Les difficultés de mise en œuvre des techniques d'élevage permettant la réduction des émissions de méthane entérique amènent donc de nombreux experts à conclure que seules la réduction du nombre d'animaux et l'installation de fermes intensives sont efficaces pour réduire les émissions sectorielles (Thorpe, 2009 dans Blanfort *et al.*, 2011).

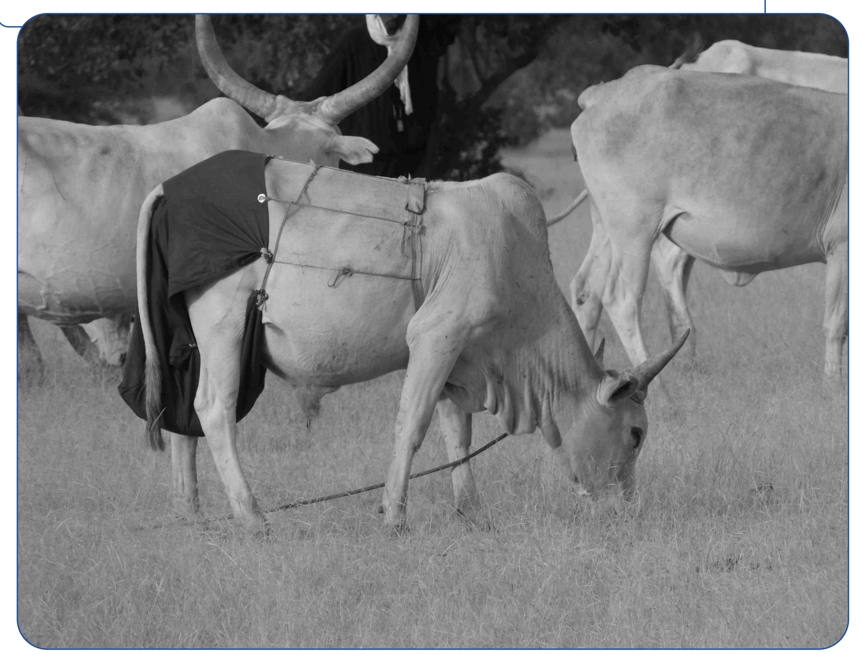
D'un point de vue méthodologique, des précautions s'imposent dans l'interprétation de ces chiffres, issus d'une simple transposition de méthodes conçues au Nord, vers des réalités du Sud. Outre la multiplicité des fonctions de l'élevage au-delà de la seule production de viande et de lait, les agroécosystèmes et modes de conduite sont très différents. Or, les techniques disponibles pour estimer les quantités de méthane entérique des ruminants sur parcours tropicaux sont limitées (Rosenstock *et al.*, 2016), et ne sont pas adaptées à certains contextes. C'est le cas de l'élevage de ruminants en Afrique de l'Ouest, où les mesures *in vivo* sur parcours s'avèrent difficiles. Dans les régions à climat semi-aride, les quantités de méthane produites par animal dépendent principalement de la quantité et de la qualité des fourrages ingérés qui fluctuent largement en fonction des saisons.

Pour évaluer l'amplitude de ces variations et trouver les bons compromis, à défaut de mesures *in vivo* disponibles sur les ruminants pastoraux, des expériences de fermentation *in vitro* de leur régime alimentaire peuvent être réalisées. Ces dernières, réalisées « en conditions définies et contrôlées », ne reflètent pas exactement les émissions journalières de méthane entérique, car il s'agit d'une reconstitution artificielle du rumen. Cependant, à défaut d'autres techniques adaptables dans les aires pastorales sahéliennes, cette méthode a été utilisée pour étudier les effets de la dynamique de la végétation sur le méthane entérique produit par les bovins au nord du Sénégal (Doreau *et al.*, 2016). Dans cette région, les éleveurs transhumants sont entièrement dépendants des fourrages naturels, dont la quantité et la qualité décroissent pendant la saison sèche. En saison des pluies, le régime alimentaire se compose d'herbacées jeunes plus digestibles et plus riches en protéines que l'herbe séchée sur pied et les ligneux (arbres et arbustes) de la saison sèche. L'étude montre que l'ingestion de fourrages de saison sèche induit une plus grande formation de méthane *in vitro*. Cependant, les quantités ingérées diminuant de plus de moitié à cette période (Assouma, 2016), la production journalière de méthane par animal n'est pas nécessairement plus élevée. Une étude croisant les effets quantitatifs et qualitatifs des changements saisonniers de l'alimentation serait nécessaire pour compléter ces premiers éléments. D'autant que si la baisse d'ingestion engendre effectivement une réduction des

émissions de méthane journalière (g CH_4/animal/jour), elle concoure à augmenter le rendement méthane (g CH_4/kg MS ingérée) (Goopy *et al.*, 2020).



Figure 3.1. Sac à fèces sur jeune bovin zébu pour mesurer l'excrétion et prédire l'ingestion, au nord du Sénégal (Assouma, 2016).



En conséquence, dans les régions où le déficit fourrager est récurrent et saisonnier, la constitution de réserves fourragères et de filières d'approvisionnement en fourrages et en aliments du bétail à faible facteur de conversion pourrait pallier la hausse du rendement méthane due au déficit alimentaire. Il conviendrait de s'assurer que ces changements de pratiques ne s'accompagnent pas de hausses indirectes des émissions de GES (transport, utilisation du sol…). La sélection de plantes moins émettrices peut aussi figurer parmi les options d'atténuation. Les légumineuses notamment et les ligneux contiennent à des degrés divers des composés secondaires (tanins, saponines), réputés inhibiteurs de la production de méthane par la modification de l'activité des microbes du rumen (Archimède *et al.*, 2018). Au Sahel, les bovins consomment naturellement une quantité significative de ligneux possédant ces propriétés (Assouma, 2016). Cependant il serait nécessaire de pouvoir mesurer les effets de ces pratiques sur les émissions de méthane (figure 3.1).

On constate à travers ces réflexions issues d'observations de terrain, que l'alimentation des ruminants et ses effets sur la production de méthane sont complexes et variables, surtout au regard de la diversité des aliments au long du calendrier fourrager annuel.

Les différents composants peuvent ainsi avoir des effets antagonistes ou au contraire synergiques. Toutefois, si les fourrages consommés ayant un facteur de conversion faible (pourcentage d'énergie ingérée convertie en méthane) sont des leviers mobilisables pour réduire les émissions, raisonner seulement en fonction du rendement méthane ou du facteur de conversion des aliments s'avère restrictif. En effet, l'atténuation des émissions de GES ne doit pas être obtenue au détriment des performances et du bien-être de l'animal ou du milieu. Par ailleurs, les paramètres concernant les émissions de méthane (facteur d'émission, rendement méthane, facteur de conversion) des fourrages tropicaux sont encore insuffisamment décrits, justifiant la mise en place d'étude sur les ressources fourragères locales prenant en compte ces multiples facteurs.

Accroître la séquestration de carbone dans les prairies et sur les parcours

Les systèmes d'élevage au pâturage ont un potentiel spécifique pour compenser une partie de ces émissions, grâce à la séquestration du carbone (C) dans le sol et la végétation des prairies et des parcours. Les plantes fourragères captent par photosynthèse le carbone de l'atmosphère, et l'accumulent dans le sol par la décomposition des racines (encadré 3.1).

Ces espaces pâturés occupent 30 % de la surface des terres émergées (soit 70 % des terres agricoles mondiales), représentant 30 % du stock de carbone du sol du monde. Mais ce potentiel de séquestration s'avère très variable (de 0 à 4 $tC.ha^{-1}.an^{-1}$) selon la zone écologique, les caractéristiques du sol, les conditions climatiques et les pratiques agricoles (Soussana *et al.*, 2010). De ce fait, la gestion des sols apparaît comme un point clé du contrôle de ces flux de carbone dans la lutte contre le changement climatique. Selon Gerber *et al.*, 2013, elle représente le potentiel de réduction des émissions le plus important au sein du secteur agricole.

Face à ces incertitudes, les références scientifiques disponibles dans les zones tropicales sur ces questions demeurent insuffisantes. Les métriques et les méthodologies standards utilisées peuvent s'avérer inappropriées pour une évaluation correcte des écosystèmes pâturés de ces régions où le potentiel de séquestration global est élevé en considérant les surfaces concernées. Les travaux de recherche présentés dans cette partie contribuent à établir des références sur les processus de séquestration du carbone à l'échelle de la parcelle sur deux terrains tropicaux en Amazonie et dans un milieu insulaire de l'océan Indien. Concernant la zone semi-aride d'Afrique de l'Ouest, les travaux qui s'y rapportent intègrent l'échelle territoire et sont donc abordés dans la dernière partie de ce sous-chapitre.

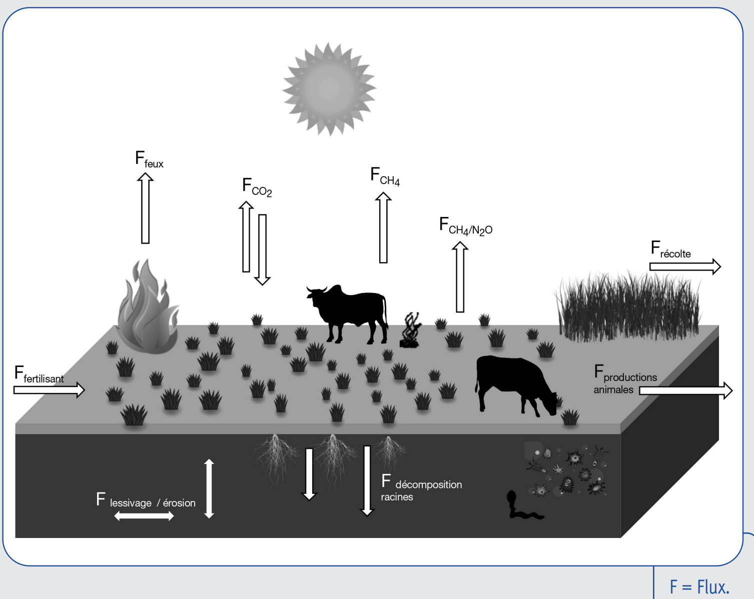
L'Amazonie est une région emblématique des enjeux de durabilité liés aux systèmes d'élevage à l'herbe. Les efforts de lutte contre la déforestation demeurent une priorité pour préserver les stocks de carbone et les autres services écosystémiques rendus par les forêts tels que la biodiversité et le maintien du régime pluviométrique. Cependant, ce principe de base doit également s'accompagner d'une gestion durable des zones converties en pâturages pour y établir des stratégies d'atténuation du changement climatique.



Encadré 3.1. Dynamiques du cycle du carbone dans les écosystèmes pâturés.



Figure 3.2. Schéma des dynamiques du cycle du carbone dans les écosystèmes pâturés (d'après Soussana *et al.*, 2010).



F = Flux.

Dans le cas des systèmes d'élevage au pâturage, basés sur l'exploitation de prairies par pâture ou récolte, les processus impliqués dans les échanges avec l'atmosphère sont complexes et imbriqués. Les échanges nets de CO_2 sont plus précisément issus :

• pour les entrées, de la photosynthèse et de la décomposition des racines sous forme de matières organiques, de la fertilisation et des déjections animales ;

• pour les sorties, de la respiration des parties aériennes de la végétation et de l'ensemble sol-racines et de la respiration des animaux (figure 3.2).

Le bilan de ces entrées et sorties peut aboutir à un stockage/déstockage du carbone. À ce titre, les prairies sont des puits de carbone potentiels. **On distingue le stockage de carbone** qui constitue un bilan net d'accumulation de carbone dans l'écosystème (qui tient compte des émissions), **du processus de séquestration** qui ne concerne que les entrées de carbone.

En Amazonie française (Guyane), des dispositifs de mesures et d'observations sur les flux et stocks de carbone ont été établis dans des systèmes herbagers issus de déforestation (Blanfort et Stahl, 2013 ; Blanfort *et al.*, 2015a). Les systèmes d'élevage bovins sont de type

extensif (~ 1 mère/ha) ; l'alimentation étant uniquement assurée par des prairies cultivées (essentiellement par la graminée *Brachiaria humidicola)*, avec une faible utilisation d'intrants. Cette gestion de type « ranching » prédomine dans toute la région amazonienne.

Le dispositif de recherche consiste en une articulation originale de deux approches. Des mesures des échanges gazeux nets de CO_2 entre l'atmosphère et l'écosystème pâturé sont effectuées dans 2 parcelles de prairies équipées de tours à flux (méthode des corrélations turbulentes). La quantification du rythme de fixation/émission du carbone par les prairies conduit à des bilans carbone annuels nets intégrant l'ensemble des processus biologiques de l'écosystème et l'impact des pratiques de gestion (telles que les temps de repos et les charges animales). En complément, une estimation du stockage de carbone des prairies est établie par des mesures de stock de carbone du sol le long d'une chronoséquence (4 forêts témoins et 24 prairies âgées de 6 mois à 36 ans). Les mesures sont effectuées jusqu'à 1 mètre de profondeur, pour appréhender des horizons plus profonds que la norme habituelle.

Les résultats montrent que les prairies issues de déforestation en Guyane fonctionnent comme des écosystèmes stockeurs de carbone (figure 3.3), à condition de les pérenniser sur plusieurs décennies (Stahl *et al.*, 2017). Après une vingtaine d'années, le stockage s'élève potentiellement à 1,27 ±0,37 tC/ha/an, tandis que la forêt d'origine voisine stocke 3,23 ±0,65 tC/ha/an (dispositif Guyaflux INRAE). L'accumulation de carbone sous forme stabilisée se réalise dans les horizons inférieurs, entre 0,3 et 1 m de profondeur (Stahl *et al.*, 2016). Ce niveau de stockage représente un potentiel d'atténuation très significatif lié au maintien dans le temps d'un couvert prairial productif et non dégradé (dense, non érodé) se développant sur un sol conservant de bonnes qualités physico-chimiques. Il s'agit notamment de favoriser l'implantation de pâturages avec un mélange de graminées et de légumineuses favorisant les entrées d'azote dans le sol. La mise en place d'un mode d'exploitation par pâturage tournant et d'un chargement adapté est également indispensable au maintien toute l'année d'une biomasse couvrante et active. L'entretien de la végétation par gyrobroyage est nettement préférable au nettoyage par le feu, qui induit des pertes d'azote et une modification de l'activité biologique. On constate par ailleurs que les conditions favorables à l'accumulation de carbone dans la matière organique des sols sous pâturage favorisent également la production d'une ressource fourragère de qualité.

Si la stratégie de séquestrer le carbone dans le sol constitue un potentiel d'atténuation avéré pour les systèmes d'élevage au pâturage, elle présente aussi des limites.

Les stocks du sol sont en effet très fragiles et peuvent être altérés de multiples manières : par un changement d'usage des terres, une augmentation de la température ou par différentes pratiques de fertilisation ou autres travaux du sol. Pour produire des références en zone tropicale, des dispositifs de recherche à l'île de la Réunion précisent les modalités et le potentiel de séquestration de carbone de prairies permanentes sur des sols volcaniques et sableux.

Le dispositif diachronique s'étend sur près de 15 ans (2004 à 2019), basé sur un essai de fertilisation organique et minérale intensive sur microparcelles de 4 m^2 en prairies permanentes utilisées pour la fauche. Il a été mené sur 3 sites :

- un site sur un sol sableux en zone côtière en climat tropical (arénosol) initialement très pauvre en carbone (20 tC/ha sur l'horizon 0-15 cm),
- et 2 sites d'altitude (900-1500 m) sur sols volcaniques (andosol) initialement très riches en carbone (80-100 tC/ha).

Les doses de fertilisation vont jusqu'à 70 m^3/ha de lisier et 12 t/ha de compost par fauche.

Les résultats montrent que le ratio entre l'augmentation du carbone du sol et le carbone apporté par la fertilisation est plus important pour le compost que pour le lisier : de 16 % à 28 % pour le compost et de 2 % à 8 % pour le lisier. Cette différence est due à la nature du carbone apporté. En effet, celui du compost est moins à même de se volatiliser, la partie volatile étant en partie perdue lors du processus de compostage. De façon globale, on mesure chaque année une augmentation significative et importante du stock de carbone du sol en réponse aux apports en matières organiques sous forme de lisier et de compost, compris entre 0,32 et 2,85 tC.ha^{-1}.an^{-1}. La séquestration en carbone s'avère plus importante sur sol sableux initialement plus pauvre en matière organique donc en carbone. Cependant, l'augmentation constatée sur les andosols reste significative, avec un cumul de plusieurs dizaines de tonnes de carbone sur toute la période alors que ces andosols par nature très riches en carbone sont réputés « saturés » en carbone (Zieger *et al.*, 2018).

Figure 3.3. Reconstitution de la dynamique des stocks de carbone après conversion de la forêt tropicale amazonienne en système herbager.

De l'acquisition de références à la mise au point de bilans énergie et de bilans carbone à l'échelle de la ferme

Dans des contextes s'appuyant sur des espaces de gestion fermés et clairement délimités, « l'exploitation agricole » est une échelle pertinente pour des actions visant l'atténuation et l'adaptation au changement climatique. Elle intègre les échelles « parcelle » et « troupeau », eux-mêmes intégrateurs des processus biologiques écologiques et physiologiques se déroulant à des échelles plus fines, dans les plantes, le sol et l'animal.

L'exploitation agricole est l'unité de gestion où sont prises les décisions concernant les pratiques, par des décideurs bien identifiés : les éleveurs, leurs familles, leurs employés. Il s'agit donc d'un niveau fonctionnel, pertinent pour dresser des bilans qui orienteront les choix stratégiques et les pratiques mises en œuvre.

Les outils de diagnostic qui caractérisent les niveaux de consommation d'énergie et d'émissions de GES à ce niveau d'organisation de « la ferme » se déclinent sous différents types : les calculateurs, les protocoles, les guides d'utilisateur et les modèles (encadré 3.2). Des démarches de construction et de mobilisation de ces outils ont été réalisées dans les deux mêmes territoires tropicaux d'outre-mer français : une situation insulaire à l'île de la Réunion et une en Amazonie française en Guyane.

L'outil Planète, conçu en métropole et validé par l'agence européenne de l'énergie, a d'abord été adapté au contexte de l'île de la Réunion pour évaluer les consommations énergétiques et les émissions de GES dans les exploitations d'élevage de ce département (Thévenot *et al.*, 2011). La forte densité humaine, combinée à l'importante production d'effluents et de fourrages, rend cruciale l'évaluation environnementale des fermes vis-à-vis du changement climatique.

À partir de cet outil renommé Planète Mascareignes, 235 bilans énergétiques ont été réalisés à La Réunion sur l'ensemble des productions animales de l'île (Vigne, 2007 ; 2009a ; 2009b ; Vayssières *et al.*, 2010 ; 2011b). Ces résultats permettent dans un premier temps de calculer le coût environnemental « de l'insularité », défini comme les consommations énergétiques et les émissions de GES supplémentaires induites par l'ensemble des coûts de transports imposés par l'isolement de l'île et le choix de développer à La Réunion des systèmes d'élevage mobilisant de hauts niveaux d'intrants importés. Globalement, ce coût est élevé car égal ou supérieur à 20 %, aussi bien en matière de consommation

Encadré 3.2. *AgriClimateChange Tool (ACCT)*, un outil de bilan énergie et de bilan carbone adapté pour les DOM – exemple de son adaptation à la Guyane en collaboration avec Solagro (www.solagro.org).

Vincent Blanfort

L'ACCT permet un **état des lieux chiffré « technique » portant sur une analyse globale** de **:**

• la dépendance énergétique de la ferme : consommations d'énergie non renouvelable, production et consommation d'énergie renouvelable (les énergies indirectes mobilisées par les achats d'aliments, d'engrais, de matériel),

• des émissions de gaz à effet de serre : émissions de GES sur la ferme (total, par poste et production/stockage additionnel de carbone dans les sols),

• des indicateurs environnementaux azotés : risques pour l'eau (bilan global au niveau « sol/SAU »).

Il s'agit d'une **analyse par atelier de production** permettant d'identifier les postes les plus consommateurs d'énergie et émetteurs de GES.

Encadré 3.2. Suite.

Cet **outil** permet finalement **d'identifier des actions d'amélioration** proposées et quantifiées en gains d'énergie, de GES, d'économie (figure 3.5).

Figure 3.5. Schématisation des sources d'émissions de GES, de variations de stock de carbone et d'émissions de GES évitées par la production d'énergies renouvelables prises en compte dans ACCT.



Source : https://solagro.org/travaux-et-productions/outils/acctool-acct-simplified-version-acct-dom.

L'ACCT est le résultat d'un processus d'élaboration à partir d'outils et de référentiels qui ont mobilisés différents acteurs depuis 1999 en lien avec Solagro et le Cirad pour les DOM :

- **Planète®** (1999-2010), création de références par système agricole (RefPlanete 2010) ;
- **Dia'terre®** (2010), outil national de l'Ademe pour le diagnostic énergie-GES de ferme ;
- **ClimAgri®** (2009), outil de l'Ademe pour le diagnostic énergie-GES à l'échelle du territoire (Solagro) ;
- **Programme Life+ AgriClimate Change**[1] (2009-2013) ;
- **ACCT-DOM®** (depuis 2014), support des politiques d'investissements énergie des exploitations agricoles dans les DOM (Antilles, La Réunion) ;
- **ACCT-DOM®** en **Amazonie** en **Guyane** (2017) et au **Brésil** (2021) mis en œuvre par le Cirad.

1. http://www.agriclimatechange.eu/

Encadré 3.3. Voir au-delà du troupeau ou de l'exploitation agricole par l'approche « cycle de vie ».

Mathieu Vigne

Depuis plusieurs années maintenant, les évaluations environnementales ne s'intéressent plus seulement aux impacts directs des activités d'élevage, c'est-à-dire les impacts qui ont lieu sur l'exploitation. Elles s'appuient sur l'approche « cycle de vie » grâce à la définition de l'ensemble des processus qui ont lieu en amont du système, principalement pour produire les intrants, et en aval, pour mettre à disposition le ou les produits du système aux consommateurs et pour traiter les déchets induits par sa consommation (figure 3.6). Cette approche permet donc de mesurer les impacts environnementaux indirects liés à la production et la consommation du produit. Pour les productions animales, l'impact indirect « emblématique » concernant les émissions de gaz à effet de serre est par exemple l'impact sur la déforestation en Amérique du Sud liée à la consommation de tourteaux de soja par les systèmes d'élevage en Europe.

Cette approche est d'autant plus importante qu'elle permet de concevoir des pratiques qui réduisent conjointement les impacts sur place (dits « directs ») et ailleurs (dits « indirects »), et donc d'éviter les « fausses bonnes idées » comme la délocalisation de la production d'aliments et de la reproduction (bovins naisseurs, bovins engraisseurs) qui peuvent entraîner des impacts liés au transport plus élevés (voir étude de cas sur l'élevage à La Réunion).

Figure 3.6. Cycle de vie d'un produit agricole.

Appliquée aux consommations d'énergie fossile et aux émissions de gaz à effet de serre, cette approche a été mise en œuvre par les chercheurs de l'UMR Selmet plus particulièrement sur de nombreux systèmes d'élevages bovins lait et viande dans différents contextes en Amérique du Sud et Centrale (Brésil, Costa Rica, Guyane), en Afrique (Burkina Faso, Burundi, Égypte, Mali, République démocratique du Congo, Zimbabwe) et dans l'océan

Encadré 3.3. Suite.

Indien (Réunion, Inde). Cette approche holistique permet également de faire des comparaisons au plus juste de systèmes très divers en matière de niveau d'intensification et mobilisation du pâturage. Nos travaux montrent que l'importance des émissions « indirectes » est plus faible pour les systèmes tropicaux dans les pays en développement largement dominés par des systèmes à bas niveaux d'intrants (Vigne *et al.*, 2015).

énergétique que d'émission de GES. Il reflète la forte dépendance des fermes vis-à-vis de l'extérieur (l'Europe et l'Amérique du Sud), surtout quand l'éleveur distribue beaucoup d'aliments concentrés à ses animaux.

De plus, ces indicateurs d'efficience et d'inefficience permettent de comparer les productions animales locales (tableau 3.1).

Tableau 3.1. Performances technico-environnementales des différentes productions animales à La Réunion en 2007 évaluées à l'échelle de l'exploitation incluant les consommations de ressources et les émissions de GES indirectes liées à la consommation d'intrants (Vayssières *et al.*, 2010).

Production animale	Efficience de conversion des aliments	Efficience énergétique	Part de la consommation d'ENR liée à l'alimentation animale	Émissions totales de GES	Coefficient de variation	Part des émissions entériques dans les émissions totales de GES
	(kg aliments concentrés consommés/ kg produit)	(kg énergie brute produite/ kg ENR consommée)	(%)	(kg éq CO_2/ kg de protéines animales produites)	(%)	(% CH_4)
Lait (élevage bovin)	0,79	0,37	55,3	87,3	24,5	26,2
Viande (élevage bovin naisseur)	4,00	0,19	31,9	239,7	66,5	65,5
Viande (élevage bovin engraisseur)	5,48	0,42	53,3	104,7	27,3	40,1
Viande (porc)	3,23	0,62	77,0	35,9	18,7	6,1
Viande (poulet)	2,19	0,36	75,3	25,9	15,6	1,8
Viande (lapin)	3,99	0,15	58,8	83,2	28,8	2,3

ENR : énergie non renouvelable.
GES : gaz à effet de serre.

La production de 1 kg de protéine de viande de bœuf est ainsi celle qui a le plus grand impact sur le plan des émissions de GES, suivie par le lait de vache, tandis que les productions de poulet et de porc ont les impacts les plus faibles. Quel que soit le type de protéines produit, c'est l'alimentation des animaux qui est la principale source de consommation d'énergie fossile (> 30 %). Les différences s'expliquent principalement par trois facteurs : l'efficience de conversion alimentaire, les taux de reproduction et de mortalité, et les taux de conversion en méthane entre ruminants et monogastriques.

Ces résultats inciteraient à première vue à la substitution de la viande rouge par la viande blanche conformément à d'autres études (De Vries et de Boer, 2021) et qui est aujourd'hui largement relayée dans les recommandations en nutrition humaine pour des raisons environnementales, en plus des arguments nutritionnels produits par le monde médical. Cependant, d'autres éléments doivent être mis en balance dans les choix alimentaires, en particulier la concurrence « feed-food ». Par rapport aux ruminants, les rations des animaux monogastriques contiennent une proportion plus importante de produits pouvant entrer en compétition avec l'alimentation humaine (Mottet *et al.*, 2017), tels que les céréales, et que les humains pourraient consommer directement et de façon efficiente. Ce n'est pas le cas des graminées fourragères, pour lesquelles seuls les ruminants sont efficients. Par ailleurs, le développement de l'élevage bovin viande à la Réunion s'est fait via l'implantation de systèmes d'élevage naisseurs à l'herbe sur de vastes zones du territoire qui durant les années 1970-80, étaient en cours de dépeuplement avec un risque de fermeture par la friche et l'invasion de plantes envahissantes exogènes. Cela s'est traduit par une relance d'activités économiques de ces zones rurales d'altitude qui ne seraient pas valorisables par d'autres activités que l'élevage.

Toutefois, toutes filières confondues, des marges de progrès importantes existent, par exemple en privilégiant des sources d'approvisionnement plus proches de la Réunion. Il s'agit aussi de réduire la distribution d'aliments concentrés pour les ruminants. Cela passe essentiellement par une amélioration de la qualité des fourrages distribués (en remplacement d'une partie des concentrés) et un meilleur suivi de la reproduction (réduction de l'intervalle vêlage-vêlage).

En Guyane, la transition envisagée de l'agriculture guyanaise, implique notamment de disposer d'outils d'évaluation contextualisés. L'objectif est d'établir des diagnostics énergétiques et d'émissions de GES ayant comme finalité d'identifier des leviers d'actions adaptés aux exploitations agricoles de ce territoire.

L'objectif est d'identifier des systèmes d'élevage plus performants et efficients sur le plan environnemental sur un territoire emblématique vis-à-vis du changement global. « L'Amazonie française » constitue en effet une situation emblématique. La Guyane est le seul département français qui connaît une augmentation de la superficie agricole utilisée (SAU) et du nombre d'exploitations. Mais malgré une situation continentale et non insulaire, ce territoire reste très dépendant des importations alimentaires ; les taux de couverture sont quasiment nuls pour le lait et de 17 % pour la viande bovine. Le doublement prévu de la population en Guyane d'ici 2030 conduira les décideurs guyanais à faire des choix déterminants sur l'aménagement de leur territoire. Une croissance endogène forte de certaines filières agricoles comme l'élevage est envisagée. Elle implique la mise en place d'un

schéma de développement du secteur ruminant en cohérence avec la préservation de la forêt (95 % du territoire, 50 % du carbone des forêts françaises) et avec le cadre des engagements climatiques européens. Une mise en valeur des surfaces déjà déforestées (parfois non exploitées) et la mise en place de systèmes herbagers avec un chargement plus élevé sont notamment évoqués. Par ailleurs, à la différence d'autres régions d'Europe plus industrialisées, le secteur agricole pèse beaucoup plus dans le bilan carbone de ce département (23 % des changements annuels d'affectation des terres forestières).

Afin de disposer de références locales, un outil bilan Énergie/Carbone a été adapté dans le cadre d'une étude réalisée dans 33 exploitations agricoles qui ont fait l'objet d'un diagnostic Énergie/Carbone dont 15 éleveurs bovin viande (Dallaporta, 2016). Les résultats montrent que l'efficience énergétique et les émissions de GES varient en fonction des types de systèmes d'élevage et de leur degré de développement (figure 3.4).

On se réfère à une typologie de l'Institut de l'élevage (2014) :

• les détenteurs de bovins correspondent à des structures de petite taille dont le chef d'exploitation est pluriactif,

• les grands domaines bovins sont des exploitations de plus de 200 ha ayant terminé leur phase d'acquisition du foncier,

• les éleveurs avec réserves foncières constituent un groupe en croissance vers le type des grands domaines bovins.

Les diagnostics énergétiques et d'émissions de GES établis sur ces élevages à l'herbe guyanais sont également très dépendants du mode de calcul choisi (figure 3.4). Exprimées par unité produite (tonne de viande), les efficiences sont deux fois plus faibles que les moyennes observées en métropole (tableau 3.2). Ceci peut s'expliquer par le fait que les systèmes d'élevage à l'herbe de Guyane se caractérisent par une alimentation à l'herbe quasi exclusive, des espèces fourragères de moindre valeur et avec une forte variabilité saisonnière ainsi qu'un chargement faible. À l'inverse, le ratio d'efficience calculé par unité de surface est très favorable en Guyane, un plus grand nombre d'hectares étant mobilisés pour chaque bovin, pouvant stocker d'autant plus de carbone dans le sol, sans consommations importantes d'énergie non renouvelables (seule l'énergie solaire est mobilisée pour la croissance des graminées, alliée à la pluviométrie naturelle). La Guyane illustre ainsi très bien le potentiel des systèmes fourragers du tropique humide, pour produire des viandes de qualité (à l'herbe), avec des coûts environnementaux largement inférieurs aux systèmes plus intensifs courants dans les zones tempérées.

Tableau 3.2. Comparaison des bilans énergétiques et d'émissions de GES en Guyane et en métropole (Bordet *et al.*, 2011 ; https://agribalyse.ademe.fr/).

Efficiences énergétiques				Efficiences émissions GES				
Par unité produite		Par unité de surface		Par unité produite			Par unité de surface	
ACCT DOM®	Planete®	ACCTDOM®	Planete®	ACCTDOM®	Agribalyse®	Planete®	ACCTDOM®	Planete®
Guyane	Métropole	Guyane	Métropole	Guyane	Métropole	Métropole	Guyane	Métropole
GJ/unité	GJ/unité	GJ/ha	GJ/ha	t éq CO_2/unité	t éq CO_2/unité	t éq CO_2/unité	t éq CO_2/ha	t éq CO_2/ha
73	30	7	16,6	27,1	14,4	12,8	4,6	5,6

Figure 3.4. Émissions de GES selon le bilan énergétique des systèmes herbagers bovins de Guyane (2013). (A) : par tonne de poids vif vendue ; (B) : par hectare de superficie agricole utilisée (SAU).

A/

Par tonne de poids vif vendue (t_{vv})

GES (t éq CO_2/t_{vv})

450
400
350
300
250
200
150
100
50
0

0 200 400 600

Énergie (GJ/t_{vv})

B/

Par hectare de SAU (ha SAU)

GES (t éq CO_2/ha SAU)

10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0

0 5 10 15 20

Énergie (GJ/ha SAU)

petits éleveurs bovins — grands domaines bovins — éleveurs avec réserves foncières

Vers des territoires d'élevage pastoraux neutres en carbone ?

Les bilans à l'échelle de la ferme décrits précédemment concernent des espaces bien délimités (les limites de l'exploitation agricole) et dont la gestion repose sur des systèmes de décision eux aussi bien définis (individuels le plus souvent). Ils s'adaptent mal à des systèmes ouverts aux importations d'intrants (encadré 3.3) ou avec une gestion communautaire des ressources qui se caractérisent également par une variabilité temporelle (saisonnalité) et une hétérogénéité spatiale des processus écologiques d'émissions de GES ou de séquestration du carbone. C'est le cas de l'élevage pastoral au Sahel, classiquement mis en cause dans le débat du réchauffement climatique, mais dont l'impact n'a jamais été évalué précisément parce que les écosystèmes pastoraux y sont complexes, peu conceptualisés, ni évalués de ce point de vue.

Un dispositif original et adapté à ces variabilités a permis d'aborder ces questions dans une zone pastorale du Ferlo sénégalais (Assouma *et al.*, 2019). Il intègre les différents compartiments de l'écosystème (animaux, sol, végétation) et mesure toutes les composantes du bilan carbone au niveau du paysage (figure 3.7). L'aire de desserte du forage de Widou (cercle de 30 km de diamètre autour du forage, soit 706 km^2) dans la région sylvopastorale du Ferlo Nord a été retenue comme unité spatiale d'analyse.

Les résultats ont montré que le bilan carbone du territoire est à l'équilibre, même s'il varie selon le lieu et la saison. Dans cet écosystème pastoral, un hectare émet pendant une année 0,71 tonne d'équivalent carbone et en séquestre 0,75 : il stocke donc la différence, soit 40 ±6 kilogrammes d'équivalent carbone. Le bilan carbone s'avère donc neutre : le stockage dans les arbres, arbustes et sols compense les émissions de GES des animaux liées à leur alimentation et au dépôt de leurs déjections. Plus finement au sein de ce territoire, on observe également une variation spatiale liée aux pratiques d'élevage. Les parcours herbeux, arbustifs et arborés, où les animaux se déplacent pour brouter, sont des lieux où la séquestration prévaut. À l'inverse, les aires de repos proches des campements et les abords des points d'eau, qui reçoivent beaucoup de déjections et où la végétation est plus rare, sont émetteurs à cause des fortes émissions de GES au niveau du sol pendant la saison des pluies. La variation saisonnière du bilan carbone a également pu être mesurée. En saison des pluies, l'écosystème émet beaucoup plus de GES qu'il ne stocke de carbone – les animaux et les mares avec leurs alentours étant les principales sources d'émission. Inversement, en saison sèche, l'écosystème stocke – les déjections et les herbes étant enfouies dans le sol par le piétinement des animaux – et les flux importants de GES au niveau des sols ayant lieu en saison de pluie diminuent considérablement du fait de la baisse de l'humidité du sol.

La mise en évidence de l'hétérogénéité spatiale et temporelle des processus d'émissions et de la séquestration du carbone permet déjà de proposer des options d'atténuation en fonction des différentes unités paysagères :
- aménager et entretenir à proximité des forages et des mares des abreuvoirs qui permettront d'éviter que les déjections soient directement déposées dans les eaux ;
- mieux valoriser la végétation naturelle qui pousse chaque année afin d'assurer une disponibilité plus longue dans le temps de ressources fourragères avec la délimitation de

Figure 3.7. Modèle simplifié des émissions de GES et du stockage du carbone d'un territoire pastoral sahélien (Assouma *et al.*, 2019).

Stockage (CO_2)
Feux (CO_2, CH_4)
Herbes
Feux (CO_2, CH_4)
Arbres et arbustes
Stockage (CO_2)
Motopompe
Combustion (CO_2)
Pâturage
Pâturage
Feuilles, fruits, tiges et bois morts ou sénescents ; renouvellement des racines
Décomposition des matières organiques dans les sols (CO_2, N_2O, CH_4)
Animaux
Déjections fèces, urine, excréta
Sols, eau des mares
Digestion (CH_4)
Décomposition anaérobique dans les mares (CH_4)
Réservoirs séquestrant le carbone
Émission de gaz à effet de serre
Carbone de l'atmosphère stocké par les plantes
Recyclage du carbone et de l'azote contenus dans la matière organique des plantes et des déjections

L'approche écosystémique du bilan carbone se base sur ce modèle. Un protocole de mesure spatialement explicite et mensuel a été mis en place de mai 2014 à octobre 2015 pour estimer les émissions de GES (méthane entérique du bétail, protoxyde d'azote et méthane du sol, des mares et de termites, carburant consommé, incendies) et la séquestration du carbone (biomasse aérienne et souterraine des arbres et arbustes, du sol et des animaux).



mises en défens temporaires accompagnées d'un bon système de pare-feu et la constitution de stock fourrager (pailles/foin) ;
• mieux valoriser les déjections animales, pour produire des fumures organiques pour la fertilisation des sols des jardins ou combustibles dans des biodigesteurs pour les populations environnantes.

Compte tenu de la saisonnalité et de la variabilité interannuelle qui conditionnent le fonctionnement de ces écosystèmes ainsi que de la mobilité des systèmes d'élevage, cette approche écosystémique du bilan carbone reste cependant à consolider par des mesures sur plusieurs années et en diversifiant les sites. La multiplication des mesures d'émission de GES et du potentiel de séquestration du carbone consoliderait ces résultats et permettrait d'intégrer ces références dans les lignes directrices du Giec concernant les systèmes pastoraux et agropastoraux, sur lesquels les connaissances sont encore déficientes, notamment la compensation des émissions par le potentiel de séquestration du carbone. L'approche pourrait également aider à comparer différents types de paysages ou territoires agricoles tropicaux, plus ou moins densément pâturés, où l'élevage s'intègre avec des zones protégées, des zones agricoles spécialisées, etc.

⁂

Ce chapitre a mobilisé les résultats de plusieurs dispositifs de recherches de terrain portant sur des systèmes d'élevage au pâturage en zone tropicale. Les éléments présentés illustrent la pertinence de la notion d'efficience environnementale pour traiter de la problématique du changement climatique, mais aussi les difficultés qu'elle soulève dans les régions tropicales et méditerranéennes.

En conclusion, il importe de souligner le manque de références scientifiques suffisamment nombreuses et solides, à l'exemple de celles disponibles dans les pays du Nord. Les chercheurs ont montré que la transposition directe vers le Sud des raisonnements, voire des mesures effectuées au Nord, est inadaptée. En effet, les mécanismes biologiques et biochimiques ne suivent pas les mêmes rythmes, n'ont pas la même intensité : photosynthèse, métabolismes, décompositions, entre autres, sont très différents sous les tropiques. En outre, les systèmes d'élevage ne fonctionnent pas selon les mêmes logiques, celles-ci sont souvent rendues plus complexes par des contraintes et opportunités spécifiques, telles que les régimes fonciers ou d'accès à la terre, les systèmes de décision, l'accès aux services et aux intrants, etc. Une première conclusion est donc l'importance de poursuivre ces travaux de production de références, pour améliorer les évaluations et ne plus devoir recourir à des transpositions de raisonnements Nord-Sud.

Au-delà des carences en références scientifiques qu'ils soulignent, ces exemples mettent en lumière le potentiel des systèmes tropicaux à l'herbe pour répondre aux défis du changement climatique. Que ce soit à l'échelle fine des parcelles et des relations sol-plante, à l'échelle intermédiaire des exploitations agricoles ou à l'échelle plus large des paysages et des territoires, nous mettons en évidence des mécanismes intéressants en matière de séquestration du carbone dans les sols, de réduction des émissions de méthane par les bovins et de consommation énergétique. Ces mécanismes dépendent de bonnes pratiques à



tous les niveaux, d'où l'intérêt de produire des outils d'évaluation ou de simulation multicritère, voire multiniveaux. Il est utile de constater que ces potentiels concernent tant les systèmes à l'herbe relativement extensifs comme en Guyane, où la gestion des prairies permet de constituer des puits de carbone jusqu'à un mètre de profondeur, que ceux plus intensifs comme à la Réunion, où les apports de matières organiques jouent un rôle non seulement de fertilisant pour les plantes fourragères, mais aussi de séquestration dans le sol.

La recherche d'efficience pour accompagner la transition agroécologique des systèmes d'élevage

Fabien Stark, Paulo Salgado, Stéphanie Alvarez, Claire Aubron, Ida Bénagabou, Mélanie Blanchard, Myriam Grillot, Sophie Plassin, René Poccard-Chapuis, Jonathan Vayssières, Mathieu Vigne

Comme nous avons pu le voir dans la section précédente, l'évaluation de la contribution des systèmes d'élevage aux enjeux de changement climatique, à travers le concept d'efficience et les différents indicateurs qui en découlent, a permis d'identifier des pratiques d'élevage à l'herbe prometteuses pour relever les défis conjugués du changement climatique et de la sécurité alimentaire. L'agroécologie est aussi une des voies évoquées dans la littérature scientifique et mobilisée par les politiques publiques nationales et internationales pour répondre aux objectifs assignés à l'agriculture, en matière de développement durable (ODD), de changement climatique, de sécurité alimentaire, de réduction des pollutions, voire de réduction de la pauvreté (FAO, 2018b). L'agroécologie peut en effet être définie comme un ensemble de pratiques agricoles qui visent à mobiliser les processus biologiques et écologiques pour la production de biens et de services.

Malgré le rôle central de l'élevage dans les processus de transferts et de bouclage des cycles de nutriments, les travaux scientifiques portant sur les principes de l'agroécologie appliquée à l'élevage sont relativement récents (Dumont *et al.*, 2013). Pour autant, les systèmes d'élevage à l'herbe et les systèmes mixtes agriculture-élevage, principalement présents en milieux méditerranéens et tropicaux, sont à même de mobiliser les principes de l'agroécologie pour répondre aux enjeux de l'agriculture. Ces systèmes exploitent et gèrent en effet une diversité des ressources naturelles n'entrant pas en compétition avec l'alimentation humaine (ressources pastorales) et mobilisent les complémentarités entre agriculture et élevage à travers le recyclage de la biomasse (coproduits, fumures organiques). Ces pratiques contribuent finalement au bouclage des cycles de nutriments et de biomasse pour réduire l'usage des intrants, recycler les sous-produits et réduire les pollutions, tant à l'échelle des exploitations que des territoires.

Pour accompagner la transition agroécologique des systèmes d'élevage, plusieurs pratiques d'élevage reposant sur ces principes peuvent ainsi être déployées. Qu'il s'agisse des pratiques d'alimentation animale, de gestion des déjections et de production de fumure organique, de gestion des ressources fourragères, tout un ensemble de leviers sont mobilisables par les éleveurs pour réussir cette transition agroécologique. À partir



du concept d'efficience, donc du ratio entre biens ou services générés et ressources mobilisées, plusieurs dimensions de la transition agroécologique peuvent être envisagées. Elles aident à concevoir et évaluer des pratiques et des systèmes d'élevage pour mieux utiliser les ressources mobilisées, et augmenter la production de biens et de services.

Nous proposons, dans ce chapitre, d'illustrer ce principe par des résultats de recherche récents, portant sur les systèmes d'élevage à l'herbe et sur les systèmes mixtes agriculture-élevage, et se focalisant notamment sur les flux de nutriments.

Bouclage des cycles pour améliorer l'efficience biochimique des systèmes d'élevage

Les travaux présentés ici sont relatifs à des pratiques d'élevage de type intégration agriculture-élevage (IAE) à l'échelle de l'exploitation, à travers l'analyse des flux d'énergie et de nutriments, dans une perspective de bouclage des cycles biogéochimiques. Pour s'adapter à la rareté croissante des ressources et réduire les externalités négatives liées à des modèles de production intensifs, tout en répondant aux demandes d'une population mondiale en expansion, les agriculteurs doivent produire plus et mieux. Sur la base des principes de l'agroécologie déclinés aux systèmes mixtes agriculture-élevage, l'efficience est en effet l'une des propriétés principales attendues de ces systèmes diversifiés (Bonaudo *et al.*, 2014).

Un système de production durable devra donc valoriser les ressources locales et mobiliser de façon efficiente les intrants afin de réduire les externalités négatives. Les quantités de nutriments (notamment l'azote) – dont les intrants auxquels de nombreux agriculteurs des pays en développement n'ont guère accès – doivent être judicieusement utilisées de manière à améliorer l'efficience de leur exploitation. Cela implique d'améliorer le recyclage et donc de conserver les nutriments dans le système.

Gestion des biomasses et production de fumure organique dans les exploitations agropastorales des savanes d'Afrique de l'Ouest

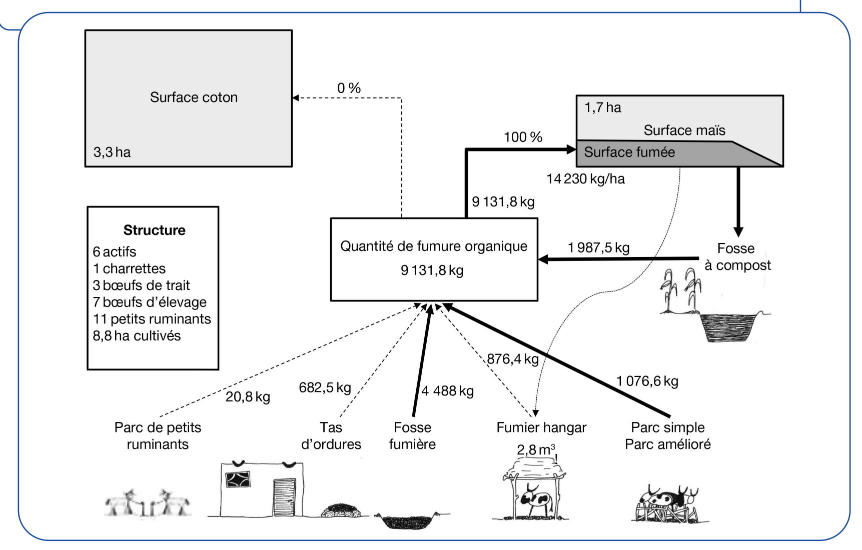
Des travaux menés dans les savanes d'Afrique de l'Ouest (Mali et Burkina Faso) se sont attachés à caractériser les pratiques de production et gestion des fumures organiques, ces pratiques de recyclage de biomasses servant à fertiliser les sols, problématique récurrente dans toutes les zones dites cotonnières (subhumides) de la région (Blanchard *et al.*, 2013).

L'analyse du recyclage des biomasses pour produire des fumures s'est faite en caractérisant les pratiques à chaque étape du cycle, en en mesurant l'efficience (carbone et azote) et en analysant la relation recyclage/pertes depuis le ramassage des résidus de culture et des déjections animales jusqu'à l'épandage du fumier et du compost au champ (figure 3.8).

Ces travaux ont permis de repérer les pratiques à même d'améliorer la proportion de résidus de cultures et de déjections animales convertie en fumure organique. Elles permettent d'améliorer l'efficience de recyclage de l'azote, indépendamment de la taille et de la structure de l'exploitation. Pour favoriser ce type de pratiques, des structures classiques de production de fumure organique sont construites, telles que les fosses à la ferme et les parcs améliorés. D'autres structures dites innovantes permettent de produire



Figure 3.8. Recyclage des biomasses et production de fumure organique chez les producteurs (Blanchard, 2010). Représentation schématique du recyclage des nutriments à travers la production et l'utilisation de fumure organique dans une exploitation type d'Afrique de l'Ouest, suivant les modes de gestion de cette fumure organique.



de la fumure organique du champ à la ferme (fosse dans le champ, parcs améliorés avec tiges de coton en litière, enclos sans litière, abri pour animaux). Les éleveurs aux pratiques innovantes diversifient les modes de production de fumure organique et les répartissent entre les champs et la ferme, mobilisant les biomasses là où elles sont produites, sans investissement important en travail et en transport. Ils utilisent ainsi plus efficacement les résidus de cultures et les déchets animaux, favorisant l'efficience de recyclage de l'azote (23 et 31 % contre 16 % de la biomasse recyclée pour les moins innovants).

Pour autant, le taux de recyclage des biomasses dans les exploitations reste limité et présente donc des marges d'amélioration. L'estimation de la valorisation des déjections animales en fumure organique est comprise entre 38 et 50 % et entre 8 et 16 % des biomasses végétales actuellement valorisées sous forme de fumure organique. L'efficience de recyclage du carbone et de l'azote reste aussi limitée avec des pertes de nutriments par lessivage et émissions gazeuses qui restent conséquentes et qui conduisent à des taux d'efficience de recyclage compris entre 8 et 11 % pour le carbone, et 16 et 37 % pour l'azote.

Ainsi, même si la production de fumure organique permet d'améliorer le recyclage de la biomasse dans ces exploitations, le recyclage des biomasses reste bien en deçà de celui requis pour le maintien de la fertilité des sols cultivés, dont la fertilisation est aujourd'hui soutenue par l'utilisation d'engrais. Compte tenu de la disponibilité limitée



de ces nutriments, l'amélioration de l'efficience de recyclage de ces nutriments devra se raisonner au-delà de l'échelle de la ferme pour soutenir le niveau de fertilité des sols.

Impact des pratiques d'intégration agriculture-élevage sur les performances agroécologiques : étude comparative d'exploitations latino-caribéennes

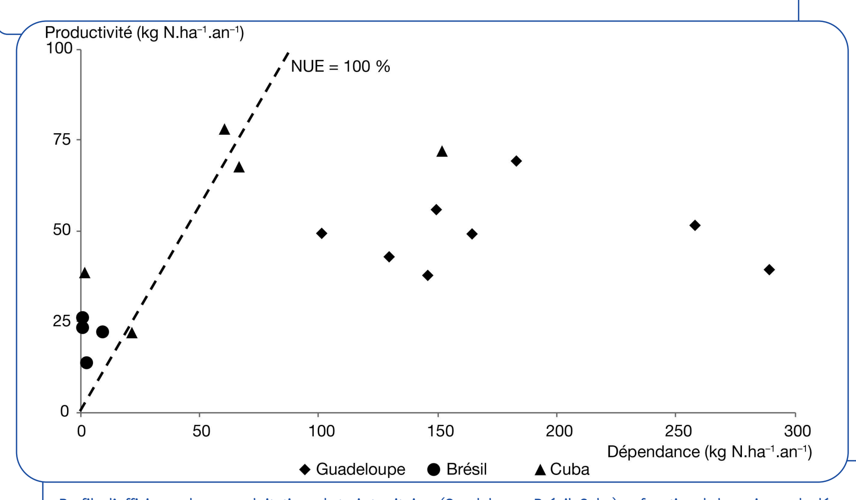
De manière à pouvoir évaluer la contribution du recyclage des nutriments aux performances dites agroécologiques de systèmes mixtes agriculture-élevage, une analyse comparative des pratiques d'intégration agriculture-élevage entre des exploitations de trois territoires latino-caribéens (Guadeloupe, Amazonie brésilienne et Cuba) a été menée dans le cadre d'une thèse de doctorat (Stark *et al.,* 2018). L'hypothèse sous-jacente est que des systèmes agricoles diversifiés et intégrés mobilisent des processus biologiques et écologiques qui leur permettent d'être plus performants d'un point de vue agroécologique et notamment en matière d'efficience.

Pour ce faire, les pratiques d'intégration agriculture-élevage mises en œuvre dans une quinzaine d'exploitations de ces trois territoires ont été traduites en réseaux de flux d'azote. L'*ecological network analysis* (ENA), une méthode d'analyse des réseaux de flux utilisée en écologie, a été mobilisée dans le cadre de ces travaux pour avoir une vision systémique de la dynamique de l'azote, à l'échelle de l'exploitation (encadré 3.4). Chaque exploitation a ainsi été modélisée en une matrice de flux, et un ensemble d'indicateurs caractérisant ce réseau de flux (intensité et organisation) et ses propriétés (résilience, dépendance, productivité et efficience) ont ainsi pu être calculés. L'efficience correspond ici au ratio entre productivité et autonomie (*output*/*input*).

Lorsque l'on analyse la relation entre productivité et dépendance des exploitations, on peut identifier différents profils d'efficience, liés en partie aux pratiques d'intégration agriculture-élevage mises en œuvre et en partie à leur niveau d'intensification. En fonction des exploitations, et dans une moindre mesure des régions d'étude, les gammes de productivité sont très larges, variant de 13 à 72 kg N·ha^{-1}·an^{-1} (produits animaux et végétaux confondus) et des niveaux de dépendance compris entre 1 et 289 kg N·ha^{-1}·an^{-1} (ensemble des intrants). L'efficience qui en résulte présente de fait des profils contrastés (figure 3.9) :
- des systèmes extensifs peu consommateurs d'intrants (dépendance ≤ 22 kg N·ha^{-1}·an^{-1}) et peu productifs (≤ 39 kg N·ha^{-1}·an^{-1}), mettant en œuvre toute une diversité de pratiques d'intégration mais de faible intensité. Il s'agit d'exploitations qui présentent des niveaux d'efficience supérieurs, voire très supérieurs à 100 % (compris entre 103 et 3 303 %), compte tenu finalement d'un faible recours à des intrants extérieurs à l'exploitation, et donc potentiellement surconsommateurs de ressources naturelles, ce qui questionne le renouvellement de la biomasse et de la fertilité des sols associés à ces systèmes.
- des systèmes intensifs, plus productifs (compris entre 38 et 72 kg N·ha^{-1}·an^{-1}) et très consommateurs d'intrants (dépendance ≥ 102 kg N·ha^{-1}·an^{-1}), mettant en œuvre peu de pratiques d'intégration de faible intensité. Il s'agit des d'exploitations les moins efficientes (14 à 47 %).

• des systèmes ayant des niveaux de productivité plus élevés (≤ 68 kg N·ha⁻¹·an⁻¹) et présentant des niveaux de dépendance intermédiaires (compris entre 60 et 66 kg N·ha⁻¹·an⁻¹), mettant en œuvre une diversité de pratiques d'intégration d'intensité conséquente. Il s'agit d'exploitations présentant des niveaux d'efficience proches de 100 %, consommant autant d'intrants que de produits exportés.

Figure 3.9. Relation entre indicateurs de productivité et de dépendance, et profils d'efficience qui en découlent (Stark *et al.*, 2018).



Profils d'efficience des 17 exploitations de trois territoires (Guadeloupe, Brésil, Cuba) en fonction de leur niveau de dépendance (exprimé en kg N·ha⁻¹·an⁻¹ provenant de l'extérieur de l'exploitation) et de leur niveau de productivité (exprimé en kg N·ha⁻¹·an⁻¹ de produits vendus ou consommés à l'extérieur de l'exploitation). La ligne pointillée correspond au *nitrogen use efficiency* (NUE) de 100 % (une unité d'azote produite pour une unité d'azote consommée) avec pour les études de cas situés en deçà des niveaux d'efficience inférieurs à 100 % et au-delà des niveaux d'efficience supérieurs à 100 %.

Encadré 3.4. Analyse des réseaux de flux de nutriments pour l'évaluation des performances des systèmes d'élevage : l'*ecological network analysis*.

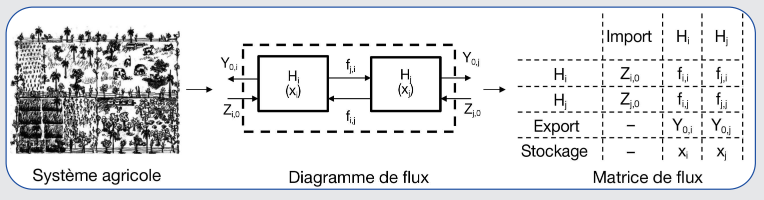
Fabien Stark

L'analyse de réseaux écologiques est une méthode de type *input-output analysis* qui consiste en une représentation quantitative des interactions entre composantes d'un système et entre ces composantes et leur environnement. Pour mener à bien ce type d'analyse, deux étapes préliminaires à l'analyse sont nécessaires : la conceptualisation du système étudié en un diagramme de flux et la modélisation du réseau de flux en une matrice de flux pour pouvoir ensuite conduire l'analyse quantitative à proprement parler (figure 3.10).



Encadré 3.4. Suite

Figure 3.10. Schéma récapitulatif des étapes de modélisation matricielle de la structure et du fonctionnement des systèmes étudiés (Stark, 2018).



Dans le cadre des travaux menés, deux groupes d'indicateurs ont été développés pour l'analyse, l'un pour caractériser l'intégration agriculture-élevage, l'autre pour évaluer les performances agroécologiques des systèmes mixtes agriculture-élevage (tableau 3.3). Les indicateurs de caractérisation de l'intégration agriculture-élevage concernent l'organisation du réseau de flux et l'intensité du réseau de flux. Ils permettent ainsi de caractériser l'intégration agriculture-élevage, suivant la complexité et l'intensité des échanges de nutriments entre les compartiments. Les indicateurs de performances renvoient aux quatre principes de l'agroécologie tels que définis par Bonaudo *et al.* (2014) : l'efficience, la résilience, la productivité et la dépendance (corollaire de l'autosuffisance).

Tableau 3.3. Indicateurs d'intégration agriculture-élevage et indicateurs de performances.

Indicateurs d'intégration agriculture-élevage	Indicateurs de performances
Activité du système $TST = \sum_{i=1}^{n} T_i$	Productivité $\sum_{j=1}^{n} Y_{0,j}$
Flux circulant $T_i = \sum_{j=1}^{n} f_{i,j} + Z_{i,0} - (x_i)$	Dépendance $\sum_{i=1}^{n} Z_{i,0}$
Intensité de l'IAE $TT = \sum_{i=1}^{j=n} f_{i,j}$	Efficience $\sum_{j=1}^{n} Y_{0,j} \Big/ \sum_{i=1}^{n} Z_{I,0}$
Average mutual information $AMI = k \sum_{i=1}^{n+2} \sum_{j=0}^{n} \frac{T_{ij}}{T_{..}} \log_2 \frac{T_{ij} T_{..}}{T_{i.} T_{.j}}$	*Overhead* $\Phi = -\sum_{i.j} T_{ij} \log \left(\frac{T_{ij}^2}{T_{i.} T_{.j}} \right)$
Statistical uncertainty $H_r = -\sum_{j=0}^{n} \frac{T_{.j}}{T_{..}} \log_2 \frac{T_{.j}}{T_{..}}$	*Development capacity* $C = -\sum_{i.j} T_{ij} \log \left(\frac{T_{ij}}{T_{..}} \right)$
Organisation du réseau de flux AMI / H_r	Résilience Φ / C

L'analyse multivariée des variables dont découlent ces résultats (Stark *et al.,* 2018) a aussi permis d'évaluer les corrélations entre pratiques d'intégration agriculture-élevage et efficience. La productivité et l'intensité de l'intégration sont partiellement corrélées, alors que, contrairement à nos hypothèses, l'intensité de l'intégration et la dépendance ne sont pas corrélées. Il semble donc que dans les situations caractérisées, les pratiques d'intégration n'apparaissent pas comme des pratiques de substitution à l'usage d'intrants (d'un point de vue quantitatif en ce qui concerne l'azote) mais qu'elles sont complémentaires et contribuent de fait à la productivité globale des systèmes étudiés. L'efficience, telle que mobilisée dans ces travaux, a ainsi permis d'identifier certains profils d'exploitations en fonction des pratiques mises en œuvre, et d'interroger les performances attendues de ces systèmes ainsi que leur durabilité.

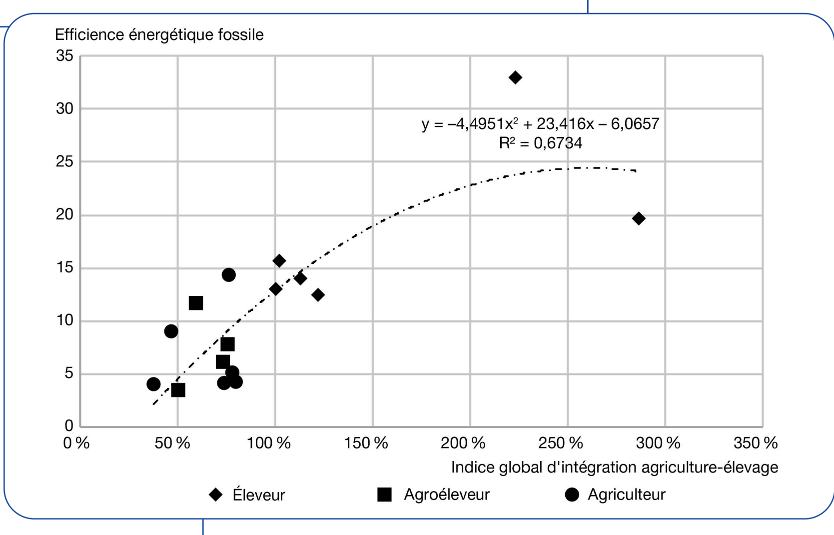
Impacts de l'intégration agriculture-élevage sur l'efficience énergétique des agroécosystèmes sahélo-soudaniens : cas de Koumbia au Burkina Faso

Par ailleurs, toujours dans les savanes d'Afrique de l'Ouest (Mali et Burkina Faso), les systèmes de polyculture-élevage ont tendance à intégrer activités d'élevage et activités agricoles. Si de nombreux travaux ont été menés sur la capacité de l'IAE à améliorer la résilience et la productivité de ces systèmes, peu ont analysé sa contribution à l'atténuation de leurs impacts environnementaux comme les consommations d'énergie fossile.

Une thèse de doctorat (Bénagabou *et al.,* 2017) visait à comparer différents niveaux d'IAE à l'échelle de 16 exploitations de la commune de Koumbia (ouest du Burkina Faso) et leur impact sur les consommations énergétiques fossiles de ces dernières. Pour y parvenir, des indicateurs décrivant les pratiques d'IAE ont été calculés : la couverture des besoins en traction animale (CBTA), la couverture des besoins en fumure organique (CBFO) et la couverture des besoins fourragers (CBF). Ces indicateurs ont ensuite été synthétisés en un indicateur global d'IAE puis ont été analysés au regard de l'efficience énergétique fossile des exploitations, considérée comme le rapport entre l'énergie brute produite sur l'énergie fossile consommée directement et indirectement.

Les résultats obtenus montrent que les trois piliers de l'IAE entraînent globalement une meilleure efficience dans l'utilisation de l'énergie fossile consommée (figure 3.11). Ce constat est particulièrement observable chez les éleveurs qui fournissent des efforts importants pour assurer une bonne couverture de leurs besoins en fumure organique, favorisés par un chargement animal élevé. D'une manière générale, l'amélioration conjointe de l'IAE et de l'efficience énergétique fossile s'explique principalement par une substitution des engrais minéraux par la fumure organique et une meilleure utilisation des résidus de culture pour l'alimentation du troupeau, entraînant ainsi une réduction des intrants de synthèse consommés sur l'exploitation et donc les consommations d'énergie fossile indirecte.

Figure 3.11. Intégration agriculture-élevage et efficience énergétique fossile (Bénagabou *et al.*, 2017).



Rapport entre l'indice global d'intégration agriculture-élevage et l'efficience énergétique fossile de 16 exploitations de l'ouest du Burkina Faso en fonction de leurs spéculations dominantes : éleveur, agroéleveur ou agriculteur.

Accroître le recyclage de la biomasse et de l'azote dans les fermes bovines laitières sur les Hautes Terres malgaches

Des travaux menés à Madagascar (Alvarez *et al.*, 2014) ont eu comme finalité de caractériser les flux de nutriments (notamment d'azote) à l'échelle des exploitations mixtes afin d'identifier les facteurs de variation à chacune des étapes du cycle de transfert. L'objectif était d'identifier si certaines pratiques d'IAE créent des systèmes plus productifs et plus durables. Ces travaux ont aussi mobilisé l'*Ecological Network Analysis* (ENA) avec cette fois-ci l'objectif d'explorer des scénarios alternatifs de gestion des nutriments.

Plusieurs exploitations représentatives de la diversité des systèmes d'agriculture-élevage des Hautes Terres à Madagascar selon une typologie basée sur les pratiques culturales et la gestion des ressources et des effluents ont servi de support d'étude. Quatre types d'exploitations mixtes culture-élevage ont ainsi été retenus :
• (T1) grandes exploitations d'élevage (> 8 animaux) avec des races bovines européennes et une diversification significative avec des activités avicoles et porcines,
• (T2) exploitations avec moins de vaches laitières (environ deux) et une diversification importante avec l'activité porcine,
• (T3) exploitations avec de petites surfaces (< 60 ares) sur collines et animaux laitiers nourris presque exclusivement de fourrages à volonté sans pâtures

• et (T4) exploitations avec 1 ou 2 zébus croisés, avec une faible production de lait avec très peu de cultures fourragères.

Quel que soit le type d'exploitation, on observe des pratiques d'intégration d'agriculture-élevage. Elles correspondent à des transferts de fourrages et de résidus de cultures du système de culture vers l'atelier élevage et à l'apport du fumier pour la fertilisation des cultures. Les exploitations étudiées ont ainsi été représentées comme des réseaux où les liens entre les compartiments représentent les flux de biomasse au sein de l'exploitation.

La plupart des flux de biomasses et de nutriments ont été quantifiés à partir des mesures au niveau de l'exploitation (production de biomasses, consommation d'aliments pour les animaux, etc.), en laboratoire pour les teneurs en nutriments, alors que certaines données ont été estimées (teneurs en nutriments et carbone des viandes, lait, œufs).

Quatre scénarios ont été conçus pour explorer les pratiques d'intensification des systèmes de production :
• (S1) l'apport d'azote pour les vaches laitières est augmenté en augmentant l'apport d'aliments concentrés,
• (S2) l'apport d'azote pour la production de riz est augmenté en augmentant l'apport d'engrais minéraux,
• (S3) l'amélioration de la conservation de l'azote lors du stockage du fumier (couverture du tas de fumier) et lors de l'utilisation / la fertilisation (rapide incorporation dans le sol)
• et (S4) la combinaison du premier et du troisième scénario.

Les effets indirects et les rétroactions induites par les scénarios sur l'alimentation animale, l'azote excrété, l'azote appliqué dans le champ, le rendement laitier et des cultures ont été pris en compte.

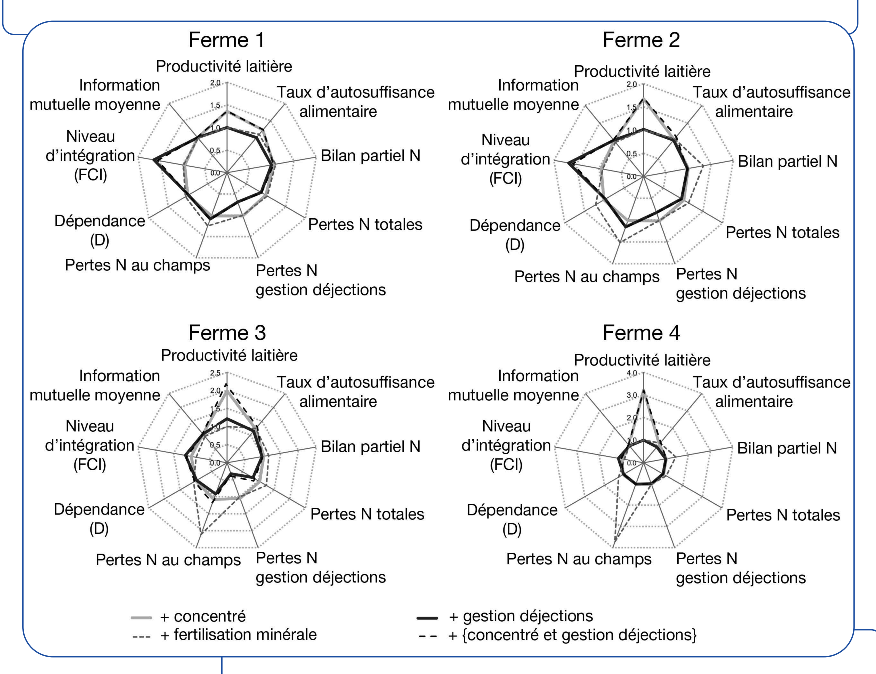
Les résultats des scénarios (figure 3.12) ont montré que les pratiques de gestion du fumier telles que la couverture des tas de fumier et une rapide incorporation au sol pourraient avoir le meilleur impact sur le degré d'intégration agriculture-élevage et l'efficacité énergétique globale de l'exploitation (+ 50 % par rapport à ligne de base), diminuant les pertes totales azotées du système (- 20 % par rapport à ligne de base). Ces pratiques, associées à l'amélioration de la qualité des aliments pour les animaux, ont montré les meilleures performances économiques avec une augmentation notable de la marge brute pour les exploitations les plus petites, une augmentation de la production laitière (40 à 300 % par rapport à ligne de base), de l'autosuffisance des ménages (30 à 50 % par rapport à ligne de base) ainsi qu'une diminution des pertes d'azote et une augmentation de la capacité de stockage de l'azote dans le sol. Les grands éleveurs laitiers présentent globalement des excédents en biomasses et en nutriments par rapport aux petites exploitations. L'amélioration de la gestion interne des nutriments grâce à une meilleure intégration de l'élevage et de l'agriculture, et l'utilisation plus efficace des engrais disponibles sont des pistes d'intérêt pour les exploitations à faible capacité en ressources de production.

Ces résultats mettent en évidence la nécessité d'une bonne gestion des ressources organiques, et en particulier du stockage et de l'utilisation du fumier, dans des systèmes



intégrant agriculture et élevage, afin de compenser les exportations de nutriments par les cultures. Un des points-clés de la conservation de la fertilité des systèmes agriculture-élevage dépend donc des pratiques visant à limiter les pertes de nutriments lors du stockage des ressources.

Figure 3.12. Changements relatifs par rapport à la ligne de base des scénarios sur la productivité, l'autosuffisance alimentaire, le bilan azoté et les pertes d'azote ainsi que les indicateurs d'analyse du *network analysis* pour les quatre exploitations des Hautes Terres malgaches (Alvarez *et al.*, 2014).



Les quatre scénarios étaient: [+ concentré] augmenter les entrées d'azote en tant qu'aliment supplémentaire ; [+ fertilisation minérale] augmenter les entrées d'azote en tant qu'engrais minéral ; [+ gestion déjections] améliorer la conservation de l'azote pendant le stockage et l'épandage du fumier et [+ (concentré et gestion déjections)] gérer le fumier et augmenter de la supplémentation alimentaire. La valeur de l'indicateur observée dans la ligne de base était la valeur de référence (c'est-à-dire que la ligne de base = 1) dans les quatre diagrammes radiaux.

Intégration territoriale et efficience des paysages

Les travaux abordés précédemment se sont appuyés sur des pratiques d'élevage (gestion des fumures, alimentation, intégration agriculture-élevage) de manière à améliorer l'efficience de l'exploitation. Les travaux de cette section s'intéressent toujours à la transition

agroécologique en élevage, mais dans une perspective territoriale, en tentant d'évaluer les contributions des élevages à l'efficience des territoires.

Efficience des paysages en Amazonie

Orienter le processus d'intensification des systèmes d'élevage vers l'efficience de paysages est devenu un enjeu majeur pour les territoires amazoniens. Il s'agit d'ajuster les pratiques d'élevage et leur localisation en fonction des aptitudes du milieu, de façon à favoriser l'utilisation efficiente des ressources naturelles. Les paysages ainsi remodelés permettent de mieux répondre aux défis agricoles et écologiques, tels que la préservation de la biodiversité, la protection des sols, l'atténuation du changement climatique et l'accroissement de la production agricole.

Pour favoriser la transition entre l'utilisation minière des ressources, héritée des dynamiques de fronts pionniers, et la construction de paysages efficients répondant aux défis de la durabilité, une analyse compréhensive des stratégies d'occupation des sols a d'abord été mise en œuvre, puis une modélisation de l'évolution des paysages, chez les éleveurs des communes de Paragominas et de Redenção, dans l'état du Pará, dans le cadre d'une thèse de doctorat (Plassin *et al.*, 2017).

Les résultats montrent que dès lors qu'ils améliorent leurs pratiques au pâturage, les éleveurs changent également leurs perceptions des propriétés du sol, lesquelles deviennent prépondérantes dans les projets d'exploitation. Cette reformulation des potentiels conduit à modifier en profondeur le paysage. Le poids des aptitudes du sol s'observe quelle que soit la stratégie d'amélioration des pratiques, toutes étant sensibles à la fertilité, la texture et la portance des sols, à la topographie, à l'accès aux ressources hydriques, voire à la distance euclidienne depuis les bâtiments ou le corral. L'intensification fourragère sur les meilleurs sols provoque une déprise ailleurs, et la mosaïque forestière évolue également : une nouvelle trame peut se mettre en place, couvrant les zones de moindres aptitudes fourragères mais de grande importance pour les sols ou le cycle de l'eau, formant des couloirs écologiques entre les massifs protégés par le code forestier brésilien.

C'est donc cet agencement plus ou moins optimisé de pâturages améliorés et de trame forestière recomposée qui caractérise l'efficience du paysage (figure 3.13). En fonction des localisations et des aptitudes, les services écosystémiques augmentent, tant dans la sphère économique (production fourragère plus abondante et de meilleure qualité, sols sous pâturages plus fertiles…) qu'environnementale (habitats recomposés pour la biodiversité, carbone séquestré et émissions réduites, humidité relative augmentée en saison sèche…).

Les indices d'efficience du paysage peuvent donc se calculer grâce à des systèmes d'information géographique, qui vont:

- mesurer les correspondances spatiales entre les aptitudes des sols et les usages qu'en font les éleveurs,
- estimer les services écosystémiques produits sur l'exploitation.



Figure 3.13. Exemple de trajectoire d'intensification de type *land-sharing* (Plassin *et al.*, 2017).

Expansion maximale des pâturages et réforme en 2000

Projet d'intensification de type *land-sharing* et d'intégration

26 km

19 km

Caractéristiques en 2000

- 12 700 ha de pâturage
- Graminée : *Brachiaria brizantha*
- 10 000-15 000 têtes de bovins
- Division des parcs (100 ha)
- Mécanisation
- Régénération des ripisylves
- 57 % de réserve forestière

Caractéristiques en 2015

- 12 700 ha de pâturage
- 15 000 têtes de bovins
- Division des parcs (20 ha)
- Intégration agriculture-élevage : ressource stockée (maïs) et fabrication de ration
- Pâturage tournant intensif

Caractéristiques biophysiques
Cours d'eau permanent

Aménagement
Limites de la ferme
Corps de ferme
Corral
Schéma de clôture
Piste

Usage du sol
Forêt
Pâturage conduite extensive
Pâturage réformé
Pâturage conduite écologiquement intensive
Pâturage tournant intensif
Pâturage intégré (maïs)
Friche pâturée

Les prairies sont intensifiées sur la base de pratiques agroécologiques (pâturage tournant et réduction de la taille des paddocks, faible apport d'intrants chimiques, régénération naturelle d'arbres). Les surfaces en forêt sont étendues aux zones de faible aptitude agronomique (versants accidentés et bas-fond par exemple).

Dans les deux cas, l'information initiale est tirée d'images satellites et modèles numériques de terrain qui, pour être correctement interprétés, font l'objet de protocoles de vérification sur le terrain, facilités par l'usage de drones et de spectrométrie infrarouge. Les indices calculés peuvent donc être agrégés par exploitation, mais aussi par commune, ce qui présente un double avantage :

- la cohérence des paysages est appréhendée à une échelle plus large, ce qui est fondamental par exemple pour la biodiversité ou la régulation du cycle de l'eau ;
- les institutions locales peuvent mesurer l'évolution des paysages dans leur juridiction, ce qui leur permet de concevoir et accompagner des réglementations spécifiques, plus adaptées que les directives nationales, et souvent mieux appropriées par les éleveurs (des plans municipaux d'usage des sols, notamment).

La thèse de Daniel Pinillos a produit un premier jeu de données permettant de quantifier des services écosystémiques sur la commune de Paragominas et de réaliser des simulations en fonction de réglementations locales (Pinillos, 2021a). Des mesures d'efficience complètes sont en cours, dans l'objectif de produire un label de certification territoriale qui garantisse transparence et attractivité du territoire, au regard d'investisseurs ou filières responsables. Ces principes d'efficience des paysages ont d'ores et déjà inspiré le nouveau « plan d'intelligence et développement territorial » de la commune, décrété en 2019.

Efficience et métabolisme territorial de terroirs villageois contrastés en Afrique de l'Ouest

En Afrique de l'Ouest, les systèmes agro-sylvo-pastoraux (SASP) sont traditionnellement organisés à l'échelle de terroirs villageois et autour de l'intégration élevage-cultures-arbres. Par des pratiques alternant le pâturage diurne et le parcage nocturne, le déplacement des troupeaux dans le terroir villageois orchestre des transferts horizontaux de matière organique et de nutriments depuis les parcours vers les champs cultivés. Ces transferts permettent le maintien sur un temps long de la fertilité des sols et des productions végétales. Cependant, depuis les années 1950, la croissance démographique et l'extension des terres cultivées se font au détriment des parcours, ce qui entraîne une diminution des transferts de nutriments et remet en question la durabilité des SASP traditionnels. En réponse, certaines communautés villageoises se réorganisent et mettent en place diverses stratégies à l'échelle des terroirs villageois pour garder des animaux malgré la régression des parcours.

Une méthodologie originale d'inventaire des flux de biomasse par enquêtes en ménages agricoles a été mise en œuvre dans le bassin arachidier du Sénégal pour comparer ces différentes stratégies et étudier le métabolisme territorial de terroirs villageois contrastés. Cette méthodologie permet notamment de calculer des indicateurs d'efficience technique (productivités animale et végétale) et environnementale, telle que l'efficience d'utilisation de l'azote. Ce dernier indicateur correspond au rapport entre les exportations d'azote (par exemple la vente d'animaux et des surplus de grains de mil) et les importations d'azote du village (par exemple les achats d'aliments pour les habitants et les



animaux). Ces indicateurs sont repris pour comparer deux terroirs villageois contrastés où les parcours ont quasiment disparu (tableau 3.4).

Tableau 3.4. Comparaison de deux terroirs villageois contrastés du bassin arachidier du Sénégal sur la base d'indicateurs calculés à l'échelle du territoire pour la campagne agricole 2012-2013 (Audouin *et al.*, 2015).

Village	Densité de la population humaine	Chargement animal	Productivité végétale (grains)	Productivité végétale (résidus de culture)	Productivité animale	Bilan azoté (village)	Efficience d'utilisation de l'azote
	(hab.km^{-2})	(UBT.ha^{-1})	(kg MS·ha^{-1})	(kg MS·ha^{-1})	(kg poids vif·ha^{-1})	(kg N·ha^{-1})	(SD)
Diohine	180	0,96	400	2070	25	8,5	0,15
Bary	320	2,31	510	3150	213	24,9	0,64

hab : habitants.
UBT: unité bovin tropical.
MS : matière sèche.
SD : sans dimension.
L'ensemble des indicateurs donnés dans ce tableau sont issus de travaux de cartographie de l'occupation du sol, d'observations de terrain et d'enquêtes en ménages agricoles. Ces enquêtes ont notamment permis de décrire la structure des terroirs villageois et de réaliser un inventaire des flux de biomasse entre chaque terroir et son environnement et au sein de chaque terroir villageois (entre ménages agricoles). Ces flux de biomasse ont dans un second temps été convertis en flux d'azote sur la base de la teneur azotée moyenne de l'ensemble des biomasses, afin de reconstituer le métabolisme azoté de chaque terroir.

Diohine correspond à un SASP extensif se rapprochant du système traditionnel où une jachère collective est pratiquée et où les élevages restent mobiles et largement alimentés avec les ressources locales (résidus de cultures, herbacées sur jachères, émondage des arbres fourragers). La jachère collective correspond à un ensemble de parcelles cultivées conjointement mises en jachère la même année pour accueillir l'ensemble des troupeaux pendant la saison des cultures. Bary correspond à un SASP plus intensif où il n'y a pas de jachère collective et où des bovins sont engraissés à l'étable en mobilisant largement des ressources alimentaires extérieures au terroir sous la forme de coproduits de l'agro-industrie sénégalaise (tourteaux d'arachide et de coton, son de mil et de riz).

L'activité d'embouche bovine à Bary permet d'accroître le chargement animal et la production de fumier à l'échelle du village. Les apports annuels moyens en fumier à Diohine sont de 0,34 t MS·ha^{-1} contre 0,49 t MS·ha^{-1} à Bary, ils couvrent respectivement 24 et 31 % de la surface cultivée à Diohine et Bary. Les coproduits de l'agro-industrie importés (3,14 kg N·ha^{-1} à Diohine, 17,6 kg N·ha^{-1} à Bary) représentent une entrée supplémentaire d'azote dans le territoire, qui est partiellement redistribuée dans l'agroécosystème par la fumure organique. Ces différences d'organisation des flux d'azote se traduisent par des efficiences et des bilans azotés différents entre terroirs villageois. Les bilans azotés davantage positifs à Bary soulignent un potentiel d'entretien de la fertilité des sols plus important dans ce village. L'efficience d'utilisation de l'azote plus élevée à Bary s'explique par les gains de productivités animale et végétale en réponse à une disponibilité en azote plus

importante pour les animaux et les plantes. Ces gains de productivité observés à Bary permettent également de nourrir une population humaine plus importante (tableau 3.4).

Ces résultats illustrent que l'azote est un facteur limitant majeur de la productivité des agroécosystèmes en Afrique de l'Ouest, et qu'accroître les entrées d'azote dans les villages sous forme d'aliments pour les animaux permet à la fois d'accroître la production de viande, la production de céréales et la fertilité des sols. En effet, ces ressources alimentaires extérieures au territoire permettent de maintenir des chargements animaux élevés, intensifier les processus écologiques (dont la concentration de la fertilité par l'intermédiaire des animaux) et accroître les efficiences techniques et environnementales des SASP (Grillot *et al.*, 2018a). La dépendance aux ressources extérieures pose question en ce qui concerne la durabilité ; elle reste acceptable tant qu'elle se limite à une valorisation des coproduits de l'agro-industrie nationale par les animaux, puisqu'elle n'entre pas en compétition avec l'alimentation humaine. Une autre source durable d'azote pourrait être le développement de cultures fourragères légumineuses fixatrices de l'azote atmosphérique.

Contribution de l'élevage au métabolisme azoté d'un village indien

Le canton indien de Petlad, dans l'État du Gujarat, présente pour deux tiers des échantillons prélevés à l'échelle d'un village des taux de nitrates dans l'eau supérieurs à la limite de potabilité de 50 mg/l. Dans un contexte de forte densité animale, une analyse du métabolisme territorial du village par les flux d'azote a été conduite (Aubron *et al.*, 2021) afin d'évaluer la contribution de l'élevage, et de ses interactions avec les cultures, dans cette pollution.

Celle-ci a consisté à mener des bilans azotés et à évaluer l'efficience d'utilisation de l'azote (azote contenu dans les produits collectés / azote apporté) à l'échelle de la parcelle, du troupeau et de l'exploitation puis à extrapoler ces bilans à l'échelle du territoire pour mettre en lumière les flux d'azote entre les différentes activités agricoles et les composantes de l'écosystème (figure 3.14).

On observe ainsi qu'en dépit d'un potentiel élevé, l'intégration agriculture-élevage est limitée à Petlad, autant à l'échelle des exploitations que du territoire. En effet, les flux d'azote entre les activités d'élevage et de cultures sont faibles, en comparaison des entrées d'azote dans chaque activité, respectivement sous forme d'engrais de synthèse (65 % de l'azote entrant dans le village) et de concentrés alimentaires (25 % de l'azote entrant). Les flux d'azote en sortie, principalement représentés par le tabac (58 %), les autres produits des cultures (22 %) et le lait (20 %), sont mineurs et la plupart des entrées d'azote sont donc perdues, vers l'hydrosphère (plus de 600 kg d'excédent d'azote par hectare à l'échelle des cultures) et l'atmosphère. Bien que les subventions pour l'achat d'engrais azotés jouent un rôle majeur dans cette déconnexion entre agriculture et élevage, cette étude montre qu'elle s'explique aussi par la structure sociofoncière très inégalitaire qui prévaut à Petlad. En effet, la plupart des propriétaires possédant des surfaces suffisantes (> 1 ha) se tournent vers les cultures irriguées plus rémunératrices et tendent à abandonner l'élevage. À l'inverse, les ménages les plus pauvres avec un accès limité à la

Figure 3.14. Représentation des flux d'azote entre les activités agricoles et les écosystèmes dans un village du canton de Petlad (Aubron *et al.*, 2021).

Entrées de N dans le village (kg N/ha)
Ma : Effluents d'élevage (1)
MiF : Engrais minéraux (715)
F_{fc} : Fourrages verts cultivés (75)
F_d : Fourrages secs (36)
C : Concentrés (274)

Sorties de N du village (kg N/ha)
Hp_{To} : Tabac (101)
Hp_O : Autres produits des cultures* (38)
Mi : Lait* (36)

Flux de N internes (kg N/ha)
V + E : Volatilisation de NH_3 et émissions de N_2O (158)
L_{CS} : Autres pertes de N issues des cultures (626)
Iw : Irrigation (126)
Ad + Bf : Déposition atmosphérique et fixation biologique (9)
Ma : Effluents d'élevage (108)
L_{LS} : Pertes de N issues de l'élevage (284)
F_n : Fourrages spontanés (7)
$F_d + F_{fc}$: Fourrages secs et verts cultivés (36)

* : Les autoconsommations de lait et d'autres produits des cultures à l'intérieur du village ont été considérées comme négligeables et non comptabilisées.

terre élèvent des animaux laitiers pour compléter leurs revenus, mais peinent à alimenter leurs animaux, faute d'accès aux fourrages. Si le renforcement de l'intégration agriculture-élevage dans le territoire représente bien un levier de réduction des excédents d'azote, il n'apparaît donc pas évident à mobiliser dans un tel contexte de verrouillage social.



Les exemples développés dans cette section montrent comment l'IAE permet des progrès en matière de transition agroécologique, en fonction de l'efficience des processus biologiques associés : gestion des déjections animales pour la fertilisation organique, alimentation animale à partir de coproduits, complémentarités entre exploitations et

activités dans un territoire. L'analyse d'efficiences, et en particulier du recyclage de l'azote, permet d'évaluer les processus à l'œuvre pour tenter de les améliorer. Toutefois, dans des contextes de forte densité démographique, le recyclage n'est plus suffisant pour répondre aux besoins, et des entrées extérieures sont nécessaires (engrais, aliments concentrés) pour assurer l'équilibre de fonctionnement des systèmes : l'efficience des recyclages n'en est que plus cruciale car elle permet de valoriser au mieux dans le système ces intrants coûteux. Qui plus est, les politiques de subvention pour l'accès à ces intrants peuvent avoir l'effet pervers de rendre les recyclages moins nécessaires, et donc de freiner la transition agroécologique. L'ensemble de ces considérations ont été mises en lumière par l'analyse des efficiences, ce qui confirme l'intérêt de cette approche pour raisonner la durabilité de l'élevage et de ses contributions territoriales.

Ces travaux ont montré le rôle central que peuvent jouer les systèmes d'élevage dans la transition agroécologique. Ils sont en effet un maillon essentiel dans le recyclage des nutriments et le bouclage des cycles biogéochimiques, au-delà de la fourniture de biens alimentaires, à même d'envisager de nouvelles formes d'agriculture qui soient à la fois productives et respectueuses de leur environnement. Pour autant, les exemples montrent des marges de progrès pour réussir cette transition agroécologique : processus biologiques et écologiques à explorer pour améliorer l'utilisation de ressources naturelles, recyclage des nutriments pour accroître l'efficience des exploitations ou bien complémentarité entre espaces d'agriculture-élevage et espaces naturels pour la production d'un plus grand nombre de biens et de services au niveau des territoires.

Évaluation multicritère de l'efficience pour rendre compte de la multifonctionnalité des systèmes d'élevage au pâturage

Jonathan Vayssières, Véronique Alary, Claire Aubron, Christian Corniaux, Guillaume Duteurtre, Alexandre Ickowicz, Xavier Juanes, Samir Messad, Emmanuel Tillard, Abdrahmane Wane, Mathieu Vigne

Les deux sous-chapitres précédents, montrent que le calcul de l'efficience permet d'orienter la production vers une gestion sobre des ressources et une réduction des impacts environnementaux négatifs des systèmes d'élevage par le calcul d'indicateurs tels que la production de viande par quantité d'énergie non renouvelable (ENR) consommée et d'émissions de GES par litre de lait produit (sous-chapitre *Introduction : l'efficience, d'un simple ratio à un cadre d'analyse opérationnel pour appuyer le développement durable des systèmes d'élevage*, p. 82). Elle permet également de rendre compte des gains d'efficience d'utilisation des nutriments et de l'énergie dans les élevages au pâturage dans le cadre de la transition agroécologique (sous-chapitre *L'efficience pour rendre compte de la complexité des contributions des systèmes d'élevage au pâturage au changement climatique*, p. 86).



Cependant, la multifonctionnalité de ces systèmes d’élevage, en lien notamment avec les ODD suggèrent que d’autres critères du développement durable (DD) soient pris en compte dans l’évaluation de la contribution des élevages au pâturage au DD des territoires et dans l’accompagnement de la transition agroécologique (FAO, 2018). En effet, les élevages au pâturage contribuent à un ensemble de services et dis-services autres qu’environnementaux qui méritent d’être reconnus (Wedderburn *et al.*, 2021 ; Muller *et al.*, 2021), qui varient selon les contextes et les systèmes d’élevage et qui évoluent dans le temps (Vall *et al.*, 2016).

Ce quatrième sous-chapitre passe donc en revue une sélection de travaux de recherche qui mettent en application un ensemble de méthodes et d’indicateurs quantitatifs venant compléter les critères environnementaux préalablement mentionnés. Certains travaux vont jusqu’à évaluer une efficience multicritère. La présentation des différents travaux suit une montée en niveau d’organisation : exploitation, ménage, filière et territoire pour rendre compte de la diversité des enjeux intervenant à ces différentes échelles.

Efficience multicritère à l’échelle du ménage ou de l’exploitation agricole

Rôle de l’élevage dans l’efficience et la viabilité socio-économique des exploitations familiales à l’ouest du delta du Nil en Égypte

La mise en culture des terres désertiques grâce à l'extension des canaux d’irrigation constitue une stratégie prioritaire en Égypte pour assurer la sécurité alimentaire face à la croissance démographique et à la fragmentation des terres dans le delta et la vallée du Nil. Cependant, le modèle de développement de ces nouvelles terres aménagées sur le désert soulève de nombreux débats en lien avec l’efficience et la durabilité des systèmes agricoles au regard de la fragilité des sols et la rareté de la ressource hydrique (Alary *et al.*, 2018). À côté de grandes fermes agricoles, des surfaces réduites (1,25 à 2,5 ha) ont été allouées à un ensemble de bénéficiaires, anciens locataires de terres ou diplômés de l’université. Ces derniers ont développé des systèmes agricoles mixtes culture-élevage combinant vergers commerciaux et cultures vivrières et fourragères avec quelques têtes de bovins (1 ou 2 vaches ou bufflesses) et parfois un troupeau d’ovins et caprins n’excédant pas 10 têtes.

Sur la base d’une enquête dans 5 localités à l’ouest du delta, nous avons construit un ensemble d’indicateurs relatifs aux notions d’efficiences technique et économique en lien avec la structure des actifs et les bénéfices socio-économiques dans le système de production (Juanes *et al.*, 2020 ; Alary *et al.*, 2020) (tableau 3.5).

Les résultats montrent des contributions contrastées de l’élevage à la viabilité monétaire des ménages. Chez les diplômés (notamment à Tiba), l'élevage a permis de financer l'investissement agricole et familial au cours des premières années d'installation. Une fois les vergers en production, l'élevage devient une épargne sur pied. Pour les autres bénéficiaires, l’élevage assume différentes fonctions. Dans les premières zones aménagées dans les années 1960 proches du delta (Nahda), l'élevage est resté une activité centrale

Tableau 3.5. Caractérisation socio-économique et indicateurs d'efficience des systèmes d'exploitation des nouvelles terres aménagées à l'ouest du delta du Nil en Égypte (172 ménages enquêtés en 2014).

Thème	Indicateurs	Nahda	Bangar	Hamman	Bustan	Tiba	Total
Caractéristiques socio-économiques du ménage	Taille du ménage (personnes)	11,15	7,70	6,74	9,90	7,40	8,67
	Superficie foncière (ha)	3,83	2,26	1,30	1,93	2,66	2,40
	Taille du troupeau en éq. UBT (1 UBT= 250 kg poids vif)	24,49	12,40	8,23	12,12	6,14	12,69
	Revenu net annuel du ménage (€/an)	17 349	9 698	6 076	10 852	7 460	10 389
	Revenu net *per capita* (€/jour/membre du ménage)	6,0	3,2	2,4	3,4	2,8	3,6
Efficience économique	Revenu net par ha (€)	5 482	4 355	3 780	3 371	3 088	3 963
	Revenu par actif familial (€)	7 561	4 525	2 667	2 774	3 521	4 123
	Profit (ratio)	0,5	0,3	0,4	0,4	0,5	0,4
	Revenu des produits animaux/valeur du troupeau	0,36	0,25	0,45	0,17	1,34	0,51
Efficience technique de l'activité laitière	Coût alimentaire/litre de lait (€)	0,23	0,29	0,16	0,23	0,18	0,22
	Rendement laitier (litres par animal et par an)	1 578	1 190	1 217	1 320	1 535	1 369
	Production laitière (€) par ha	1 683	477	620	975	854	926

du système d'un point de vue technique et économique. Dans les zones aménagées dans les années 1980, si les producteurs de la zone de Bangar bénéficient d'une sécurité monétaire grâce aux cultures commerciales, la zone de Hamman connaît des problèmes fréquents d'irrigation qui expliquent une diversification des activités d'élevage notamment vers les ovins et caprins et une plus faible efficience économique par hectare ou par actif familial. Enfin, les systèmes agricoles très diversifiés de la région de Bustan aménagée dans les années 1990 et relativement éloignée des centres urbains mobilisent une grande partie de la main-d'œuvre familiale disponible expliquant une plus faible efficience par actif. On note cependant de bonnes performances techniques du bétail liées à l'expérience des fermiers, anciens colons venus des anciennes terres. Plus globalement, l'analyse comparée par zone montre que l'activité d'élevage contribue de manière significative à l'efficience économique et par conséquent à la viabilité socio-économique des ménages ruraux dans ces zones aménagées à l'ouest du delta. Mais cette contribution doit être évaluée au regard des rôles contrastés de l'élevage en lien avec la disponibilité

en ressources naturelles (eau et sol), le peuplement d'origine (anciens fermiers des terres du delta ou diplômés) et les liens du ménage avec les centres urbains. Ainsi, cette analyse montre bien la nécessité d'une approche multicritère et multiscalaire pour comprendre et évaluer la contribution de l'élevage à la viabilité socio-économique d'une diversité d'exploitations agricoles occupant un territoire.

Effets des gains d'intégration agriculture-élevage sur l'efficience multicritère des élevages bovins laitiers à La Réunion

Les élevages bovins laitiers à La Réunion sont caractéristiques des systèmes d'élevage intensifs à haut niveau d'intrants. Ils consomment des quantités importantes d'aliments concentrés et d'engrais de synthèse riches en nutriments pour fertiliser les prairies avec un ensemble de risques environnementaux associés. Dans une démarche d'intensification durable, la finalité de ces travaux était d'identifier les pratiques permettant d'accroître l'efficience d'utilisation des nutriments et de l'énergie, tout en cherchant à maintenir, voire accroître, la productivité et la viabilité économique des fermes d'élevage.

Pour cela, un modèle de simulation de l'élevage bovin laitier a été développé (Vayssières *et al.*, 2011). Il simule la dynamique des stocks et des flux de biomasse et du cycle de l'azote en élevage bovin laitier. La représentation et la quantification de l'ensemble des flux de biomasse permettent d'évaluer de façon multicritère chaque changement de pratiques sur la base d'indicateurs d'efficiences environnementale, technique, économique et sociale (tableau 3.6).

Les leviers mis en avant dans ces travaux concernaient une meilleure valorisation des fourrages et des engrais de fermes produits sur l'exploitation en remplacement d'une partie des aliments concentrés et des engrais de synthèse importés.

Les résultats des simulations confirment qu'une meilleure valorisation des ressources disponibles et produites sur la ferme (fourrages, engrais organiques et animaux reproducteurs) permet d'accroître l'**efficience multicritère** de la ferme en matière d'utilisation des terres, des aliments concentrés, de la main-d'œuvre, de l'azote et de l'énergie, tout en augmentant la marge brute des fermes. Il existe cependant un **compromis à trouver** entre performances environnementales, techniques et économiques d'un côté et performances sociales de l'autre, puisque, par exemple, une meilleure valorisation des ressources de l'exploitation agricole engendre, d'un côté une charge de travail plus importante pour les éleveurs et de l'autre une efficience du travail plus élevée (Vayssières *et al.*, 2011).

Tableau 3.6. Conséquences de différents leviers techniques définis avec les éleveurs sur différents indicateurs d'efficience calculés avec le modèle Gamede pour une exploitation typique des systèmes laitiers à La Réunion dans les années 2000.

Leviers	Degré d'IAE	Efficience d'utilisation des terres	Efficience alimentaire	Efficience du travail	Efficience azotée	Efficience énergétique
	(SD)	(UFL de fourrages produits/ha/an)	(litre de lait produit/kg MB)	(marge brute en €/h travaillée)	(SD)	(SD)
0- ligne de base, c.-à-d. le système pratiqué	0,6	4 600	1,16	13,8	0,26	0,35
1- Meilleure utilisation des engrais organiques produits sur l'exploitation	+ 12,5 %	+ 10 %	0 %	− 9 %	+ 24 %	0 %
2- Meilleure utilisation des fourrages produits sur l'exploitation	+ 3,5 %	+ 1 %	+ 8 %	+ 14 %	+ 9 %	+ 6 %
3- Amélioration des performances de reproduction	0 %	− 2 %	+ 1 %	+ 7 %	+ 7 %	+ 3 %
Tous leviers confondus (leviers 1 à 3)	+ 18 %	+ 9 %	+ 9 %	+ 12 %	+ 40 %	+ 9 %

À l'exception de la première ligne (scénario 0) qui est en valeur absolue, l'ensemble des résultats est exprimé en valeur relative, c'est-à-dire en pourcentage (%) de variation en référence aux valeurs du scénario 0.
IAE : intégration agriculture-élevage calculée selon un indicateur d'analyse des réseaux écologiques sur la base des flux de nutriments (encadré 3.4).
SD : sans dimension.
UFL : unité fourragère lait.
MB : matière brute d'aliment concentré consommé.

Évaluation multicritère de la durabilité de systèmes laitiers dans un territoire en Inde

L'Inde est aujourd'hui le premier producteur mondial de lait à la faveur d'un modèle de développement du secteur porté par des politiques structurantes (révolution blanche). S'appuyant sur des millions de petits producteurs, parfois sans terre, possédant en moyenne 1 à 2 vache(s) ou bufflesse(s), l'élevage laitier est souvent mis en avant comme un levier de développement socio-économique majeur pour les sociétés rurales indiennes.

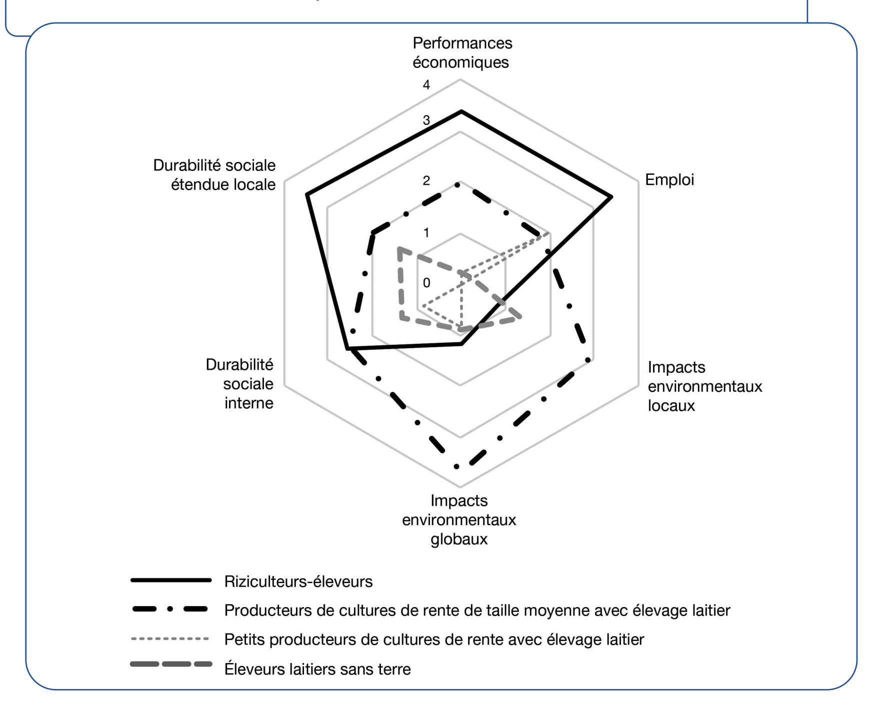
Une méthode d'évaluation multicritère a été conçue pour analyser la durabilité interne de quatre systèmes laitiers contrastés identifiés dans le canton de Vinukonda (Andhra Pradesh) et mesurer leur contribution au développement durable du territoire (Marblé, 2019).



Cette méthode s'appuie notamment sur des indicateurs d'efficience économique (par exemple la richesse créée par animal), d'emploi (par exemple le pourcentage de la population active investie dans l'élevage), d'impacts environnementaux locaux (par exemple la quantité d'eau consommée par litre de lait produit) et globaux (par exemple les émissions de GES par litre de lait produit).

Les résultats obtenus ont été traduits sous forme de scores et synthétisés selon six principales dimensions de la durabilité : performances économiques, emploi, impacts environnementaux locaux et globaux, durabilité sociale interne et étendue locale (figure 3.15). La contribution de l'élevage laitier au développement du canton de Vinukonda s'appuie sur la diversité des systèmes de production agricole. Les riziculteurs-éleveurs laitiers apparaissent ainsi comme le système le plus durable aux plans économiques et sociaux, alors que les producteurs de cultures de rente (tabac, coton, piment, ricin) de taille moyenne avec élevage laitier représentent le système le plus durable d'un point de vue environnemental. Les éleveurs laitiers ayant un accès restreint au foncier – petits producteurs de culture de rente avec élevage laitier et éleveurs laitiers ouvriers agricoles sans terre – obtiennent de faibles scores, en ce qui concerne la durabilité sociale et l'efficience économique notamment, mais ils contribuent à la création d'emploi dans le territoire, en particulier les premiers.

Figure 3.15. Scores obtenus par les quatre systèmes laitiers du canton de Vinukonda (Andhra Pradesh, Inde) selon six dimensions de la durabilité.



Afin de favoriser un développement durable et inclusif du territoire, le développement de l'élevage laitier doit intégrer cette diversité de systèmes et garantir l'inclusion des élevages faiblement dotés en terre. En particulier, il s'agit de leur faciliter l'accès à la terre et à l'eau d'irrigation afin qu'ils intensifient la conduite des troupeaux et augmentent ainsi la productivité, la création de richesse et les revenus. Mais cette intensification ne doit pas se faire au prix d'une déconnexion de l'agriculture et de l'élevage comme observée dans d'autres territoires, entraînant des consommations d'engrais de synthèse et d'aliments concentrés en grandes quantités, et donc des impacts négatifs sur l'environnement local et global (Vigne *et al.*, 2021b ; Aubron *et al.*, 2021).

Efficience multicritère à l'échelle de filières et de territoires

Efficience économique des chaînes de valeur de viande bovine internationalisées en Afrique australe

Dans la plupart des pays subsahariens, le commerce de la viande est en plein essor sous l'effet conjugué d'une demande intérieure et régionale croissante, voire d'un marché d'exportations de niche tel qu'au Botswana et en Eswatini. Les exportations de viande sont promues par ces pays pour les gains en devises étrangères, mais aussi en filigrane pour communiquer sur la capacité de ces pays à produire en respectant des standards internationaux souvent très stricts.

La chaîne de valeur de viande bovine en Eswatini, ici étudiée, repose sur une multitude de petits producteurs de zébus sur parcours. Une proportion importante de la viande bovine provient de transactions contractuelles sur du bétail vif avec la Swazi Meat Industries, un abattoir et un atelier de découpe de viande bovine qui bénéficie d'accords exclusifs d'exportation de viande de qualité vers l'Europe, principalement la Norvège. Cet engagement dans des filières de commerce international pose des questions de compétitivité, d'efficience de la chaîne de valeur et de protection du marché intérieur.

Leurs performances ont été analysées à travers leurs *contributions à l'économie nationale et sectorielle* (PIB et PIB agricole). *Le ratio du coût en ressource intérieure* qui mesure l'avantage comparatif d'une chaîne de valeur donnée par rapport aux autres chaînes de valeur de produits pouvant utiliser les mêmes types de ressources ; le *coefficient de protection nominal* qui mesure le rapport de la valeur entre les produits ou intrants valorisés aux prix de marché intérieur et aux frontières (de référence car en l'absence d'une intervention) ; et le *coefficient de protection effective* qui permet d'identifier de potentielles distorsions des marchés en analysant le rapport entre les valeurs ajoutées aux prix intérieurs et mondiaux sont autant d'indicateurs qui peuvent être assimilés à des indicateurs d'efficience économique et qui permettent de renseigner la dimension économique de la durabilité d'une chaîne de valeur (tableau 3.7).



Tableau 3.7. Indicateurs de performances économiques de la chaîne de valeur de viande bovine en Eswatini (Wane *et al.*, 2018).

	Contributions à l'économie nationale et sectorielle en 2017				Indicateurs d'efficience économique	
	En milliards d'euros	Contribution directe	Contribution indirecte	Contribution totale		
PIB à prix constants de 2011	4,1	1,2 %	0,8 %	2,0 %	Ratio du coût en ressource intérieure (CRI)	0,2
PIB à prix courants	4,0	1,2 %	0,8 %	2,1 %	Coefficient de protection nominal (CPN)	1,2
PIB agricole à prix constants de 2011	0,3	18,8 %	12,7 %	31,5 %	Coefficient de protection effective (CPE)	0,6
PIB agricole à prix courants	0,3	19,0 %	12,8 %	31,8 %		

La valeur ajoutée totale créée par la chaîne de valeur de la viande bovine représente environ 2 % du PIB (1,2 % de contribution directe et 0,8 % de contribution indirecte) et 32 % du PIB agricole (19 % de contribution directe et 13 % de contribution indirecte sous forme de versements de salaires, paiement de taxes et impôts, etc.). Par le biais des taxes, et une fois les subventions de l'État prises en compte (principalement sur les médicaments vétérinaires fournis aux petits éleveurs), la chaîne de valeur de viande bovine a un impact positif sur les finances publiques. Cependant, elle contribue négativement à la balance commerciale du fait des importations massives de viandes en provenance d'Afrique du Sud et du Mozambique pour répondre à une demande locale croissante. La chaîne de valeur de viande bovine dispose d'un avantage comparatif par rapport au marché international car elle valorise de façon efficiente ses ressources intérieures (parcours, capital et travail) pour générer de la valeur ajoutée (CRI < 1) en exportant une viande de qualité. Elle bénéficie d'une certaine protection par rapport aux importations de viandes (CPN > 1).

En conclusion, promouvoir des exportations présente des bénéfices en ce qui concerne l'amélioration de la balance des paiements et la mise aux normes sanitaires de produits pour répondre à une demande exigeante sur le marché européen. Toutefois, destiner ses produits de meilleure qualité à l'exportation, tout en produisant et en important massivement des produits de qualité inférieure pour son marché intérieur, pose une question de durabilité, notamment dans un mode changeant au sein duquel certains chocs (sanitaires par exemple) peuvent remettre en cause des chaînes d'approvisionnement existantes.

Évaluer les impacts des chaînes de valeurs laitières en Afrique : une approche multicritère

Pour les pays du Sahel, fortement fragilisés par diverses crises socio-économiques et par le changement climatique, la vente du lait constitue un moyen de sécuriser les conditions de vie de millions de familles d'éleveurs pastoraux et agropastoraux. En 2018, ces familles ont produit 3,6 millions de tonnes de lait en Afrique de l'Ouest. La majeure partie de ce lait est autoconsommée ou commercialisée localement et seulement 5 % environ fait l'objet d'une collecte par les laiteries (Corniaux *et al.*, 2014).

L'inclusion de ces éleveurs dans les chaînes de valeur laitière est contrainte par les difficultés de collecte du lait en zone agropastorale. Les laiteries font face à l'absence d'infrastructures de transport, à la dispersion des troupeaux liée à la mobilité pastorale et aux faibles rendements laitiers par vache. Et surtout, la part des importations de poudre de lait en a été renforcée depuis 10 ans par la baisse des barrières douanières ouest-africaines et par un regain de dynamisme des exportateurs des pays du Nord. De nombreuses firmes européennes se sont engagées dans l'exportation de produits laitiers enrichis en matière grasse végétale, appelées « mélanges MGV ». Ces poudres lactées, 30 % moins chères que les poudres de lait, utilisent pour la plupart de l'huile de palme. Elles entrent quasiment sans droits de douane (5 %) sur le marché ouest-africain. En 2019, les poudres de lait et les mélanges MGV ont représenté au total près de 40 % de la consommation de « produits laitiers » en Afrique de l'Ouest et plus de 90 % dans certaines capitales (Duteurtre *et al.*, 2020).

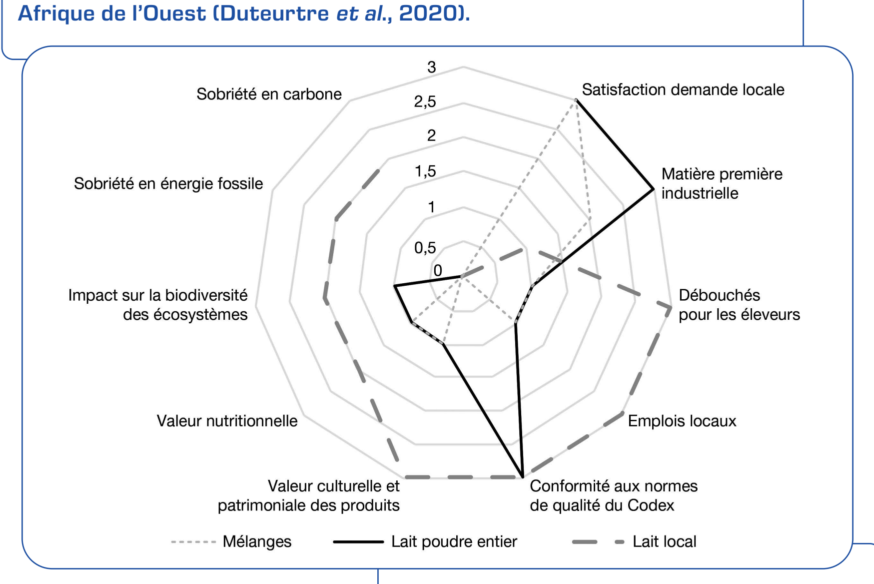
Les politiques commerciales, qui visent à faciliter l'entrée de produits importés bon marché pour répondre à la demande, s'opposent ainsi aux politiques sectorielles laitières, qui visent à promouvoir une production locale et des chaînes de valeur inclusives créatrices d'emploi. Une approche multicritère a été conduite pour comparer les impacts des chaînes de valeur laitières utilisant différents types de matières premières. Cette évaluation s'est basée sur une revue de littérature sur les dimensions économiques, sociales, nutritionnelles et environnementales de ce commerce (Duteurtre *et al.*, 2020).

Si l'importation des poudres a permis aux industries laitières locales de répondre efficacement à la demande croissante en produits laitiers, elle a cependant généré des impacts socio-économiques et environnementaux négatifs. La collecte de lait local apparaît en effet beaucoup plus « efficiente » que l'utilisation de poudres lactées pour la création d'emplois en zone pastorale, pour la conservation de l'environnement et pour limiter les risques de tromperie des consommateurs, les mélanges MGV n'étant pas à proprement parler des produits laitiers (figure 3.17).

Cette étude a permis de souligner que des politiques de promotion du lait local pouvaient avoir des impacts sociaux, nutritionnels et environnementaux déterminants. Ces travaux doivent être complétés par des évaluations quantitatives plus approfondies, notamment sur les dimensions sociale et environnementale.



Figure 3.17. Évaluation multicritère des chaînes de valeur laitières en Afrique de l'Ouest (Duteurtre *et al.*, 2020).



Scores : 0, plutôt négatif ; 1, plutôt positif ; 2, positif ; 3, très positif.

***

L'ensemble de ses travaux conduits en Afrique du Nord, de l'Ouest et australe ainsi que dans l'océan Indien (Inde et île de La Réunion) illustre l'importance des services rendus par les élevages au pâturage à plusieurs niveaux d'organisation et leur contribution à de nombreux ODD. Ces différents travaux montrent aussi comment ces différents services ou dis-services peuvent être en partie évalués par des indicateurs d'efficience. L'expérience développée dans le cadre de ces travaux nous permet aujourd'hui de proposer des exemples d'indicateurs d'efficience pour évaluer la contribution des élevages au pâturage aux ODD (tableau 3.8).

La mise en œuvre d'indicateurs quantitatifs d'efficience pour chacune des dimensions du DD (environnementale, technique, sociale et économique) sur des situations concrètes met en évidence un ensemble de compromis à la fois dans la diversité des systèmes d'élevage et dans l'exploration des voies d'évolution de ces systèmes d'élevage et des chaînes de valeurs correspondantes. Ces différents travaux montrent également qu'il n'est pas toujours possible de proposer des indicateurs quantitatifs d'efficience pour chacun des services ou dis-services rendus par les élevages au pâturage. Autrement dit, l'efficience ne permet pas de rendre compte de l'ensemble des services et fonctions des élevages. L'évaluation quantitative de la dimension sociale du DD pose notamment question. Par exemple, la solidarité et l'équité sont des critères de durabilité sociale difficilement évaluable au regard de l'efficience.



Tableau 3.8. Exemples d'indicateurs d'efficience proposés pour évaluer la contribution des systèmes d'élevage à 10 ODD.

N°	Intitulé de l'ODD	Indicateur d'efficience potentiellement utilisable (illustratif)
1	Pas de pauvreté	Nb d'habitants rémunérés par l'élevage / 1 000 Ax
2	Faim zéro	kg de lait, de viande ou de protéines produits / ha ou / ménage
3	Bonne santé et bien-être	ha de paysages (récréatifs) entretenus / 1 000 Ax
5	Égalité des sexes	Nb de femmes impliquées ou rémunérées / troupeau ou / ménage grâce à l'élevage
6	Accès à l'eau	l d'eau consommés / kg de viande produit
7	Accès à l'énergie	MJ d'ENR consommés / l de lait produit; MJ produits / 1000 Ax
8	Travail décent et croissance économique	Nb d'emplois générés / 1 000 Ax
12	Consommation et production durables (équité)	kg de produit perdu le long de la chaîne / kg de produit au niveau du troupeau ; € qui revient à l'éleveur / € payé par le consommateur
13	Changement climatique	kg éq CO_2 émis / UBT ; kg éq CO_2 stocké / ha de prairies ou de parcours (bilan GES ou bilan carbone)
15	Écosystèmes terrestres	Nb d'espèces présentes / ha de prairies ou de parcours ; émissions de NH_3 / ha ou / 1 000 Ax

Nb : nombre.
Ax : animaux.
UBT: unité bétail tropical.
ENR : énergies non renouvelables.
GES : gaz à effet de serre.

Enfin, le calcul de l'efficience multicritère constitue un véritable front de recherche mobilisant des méthodes et outils pointus et complexes à mettre en œuvre (encadrés 3.5 et 3.6) et des cadres conceptuels originaux (encadré 3.7). Ces travaux de recherche sont aujourd'hui très attendus pour renseigner et identifier des trajectoires de développement durable basées sur l'élevage au pâturage.

Encadré 3.5. Analyser les frontières d'efficience pour trouver les bons compromis entre gain de productivité et réduction des impacts environnementaux en systèmes bovins laitiers.

Emmanuel Tillard, David Berre, Emmanuelle Payet, Philippe Lecomte, Jonathan Vayssières, Stéphane Blancard, Jean-Philippe Boussemart, Hervé Leleu

Une étude menée en 2014 (Berre *et al.*, 2014) s'est focalisée sur la recherche d'un compromis entre la production laitière et ses impacts environnementaux en matière d'émissions de gaz à effet de serre (GES) et d'excédent azoté dans des systèmes d'élevage bovin laitier à haut niveau d'intrants à La Réunion.

Un scénario type a été identifié, pour chacun des trois acteurs « type » de la filière laitière (l'éleveur, la coopérative laitière et « l'environnementaliste »). Les scénarios « éleveur » et « coopérative » cherchent à maximiser la production laitière sans aggraver les impacts négatifs sur l'environnement ; la coopérative conserve la possibilité d'augmenter les moyens de production, alors que ceux-ci sont maintenus constants dans le scénario « éleveur ». Le scénario « environnementaliste » vise uniquement à minimiser les impacts négatifs de la production sur l'environnement. Un quatrième scénario « intensification durable » combine maximisation de la production laitière et minimisation des impacts environnementaux.

Pour évaluer l'efficience multicritère des élevages laitiers, des données techniques et environnementales ont été collectées dans 51 élevages (Payet, 2010 ; Vigne, 2007) qui représentaient 61 % de la production laitière de l'île. Un modèle d'optimisation économique, dit « analyse des frontières d'efficience », multiproduits et multifacteurs de production (c'est-à-dire ressources et intrants mobilisés), a été élaboré pour estimer les marges de progression de la production laitière et les réductions simultanées d'émissions de GES et des excédents azotés.

La production laitière est bien maximisée dans le scénario « coopérative » et les impacts environnementaux minimisés dans le scénario « environnementaliste » (tableau 3.9). Des quatre scénarios, le scénario « intensification durable » a conduit au meilleur compromis, avec une diminution potentielle de 238 g éq CO_2 par litre de lait (–13,93 % par rapport au niveau moyen observé) et une augmentation potentielle de +7,72 l de lait produit (+16,45 %) pour chaque kilogramme d'excédent d'azote.

Ces résultats sont issus d'une gestion optimisée des interactions cultures-élevage et des processus de production. Les impacts environnementaux des systèmes laitiers de la Réunion demeurent toutefois plus élevés que ceux décrits dans la littérature pour des systèmes d'élevage laitiers sur prairies (Vigne *et al.*, 2012). Ces différences pourraient être liées à des aspects propres au contexte de la Réunion (consommation d'intrants importés, disponibilité et qualité des fourrages) mais également à des aspects liés à la conduite des troupeaux (chargement élevé par hectare, gestion des prairies). On confirme ainsi que l'analyse des frontières d'efficience peut apporter un éclairage nouveau sur l'analyse comparative des systèmes laitiers tropicaux à hauts niveaux d'intrants *versus* à l'herbe.

Encadré 3.5. Suite.

Tableau 3.9. Optimisation des *outputs* et des *inputs* et efficience environnementale des différents scénarios.

	Variation relative des indicateurs (%)						Indicateurs en valeur absolue		
		Consommation de facteurs de production (*inputs*)					Excédent azoté		Bilan GES
Scénarios	Production de lait en %	Effectif troupeau en %	Aliments en %	Main-d'œuvre en %	Bilan GES en %	Excédent azoté en %	kg N/ha	kg lait/ kg N	kg éq CO_2/l lait
Éleveur	+ 5,8	0	0	0	0	0	274	49,6	1,62
Coopérative	+ 14,3	+ 17,4	+ 14,6	+ 20,0	0	0	274	53,6	1,50
Environnementaliste	0	0	0	0	− 13,6	− 13,7	236	54,4	1,48
Intensification durable	+ 6,6	+ 7,9	+ 8,4	+ 8,6	− 8,2	− 8,5	251	54,7	1,47

Encadré 3.6. Évaluation multicritère et spatialisée des impacts environnementaux et socio-économiques d'une filière d'élevage dans plusieurs territoires

Jonathan Vayssières, Alexandre Thévenot, Yves Croissant, Emmanuel Tillard

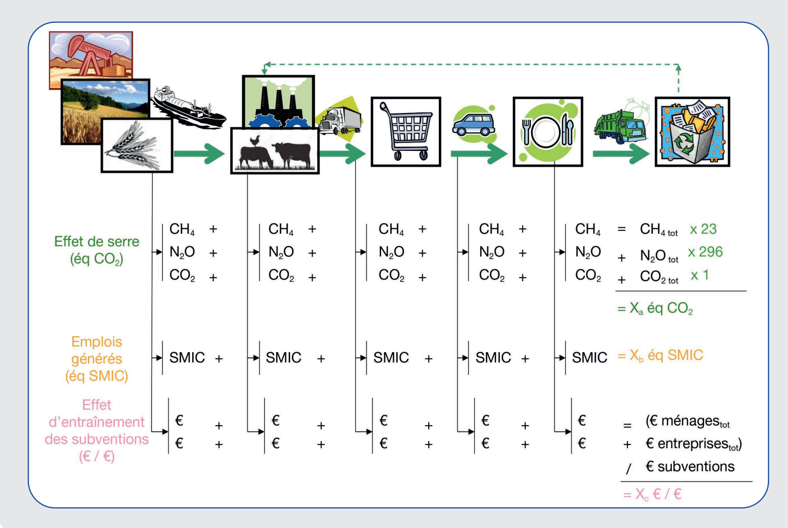
Dans le cadre d'un partenariat étroit avec les principaux acteurs des filières animales à La Réunion, nous avons montré qu'il est possible d'intégrer deux méthodes d'évaluation basées sur un même jeu de données d'inventaire : l'analyse de cycle de vie environnementale et la méthode des effets (Thévenot, 2014). Ces deux méthodes, bien qu'issues de disciplines scientifiques différentes, les sciences environnementales et économiques respectivement, permettent de spatialiser l'effet de différents scénarios d'évolution de la filière sur diverses catégories d'indicateurs environnementaux (santé humaine et des écosystèmes, épuisement des ressources) et socio-économiques (création de valeur ajoutée et d'emplois) tout au long de la chaîne de valeur (figure 3.16). Cette méthode est ici illustrée sur les filières d'élevage à La Réunion. Elle mériterait d'être remobilisée pour étudier des filières construites sur des systèmes d'élevage pâturant dans différentes régions du monde.

Les résultats pour les filières d'élevage à La Réunion montrent que l'essentiel des impacts environnementaux (environ 80 %) est externalisé du territoire de l'île, à savoir en Europe et en Amérique du Sud, en raison de la forte dépendance à l'égard des ressources extérieures (énergie fossile et matières premières utilisées pour l'alimentation du bétail). En ce qui concerne la dimension socio-économique,

Encadré 3.6. Suite.

l'essentiel (environ 90 %) de la création d'emplois se fait sur l'île grâce à l'utilisation de services locaux (élevage, abattage, conditionnement). Plusieurs options d'atténuation des impacts environnementaux ont été explorées avec les acteurs de la filière (Thévenot *et al.*, 2013). L'amélioration de l'efficience d'utilisation des aliments concentrés à la ferme, telle que définie par les travaux conduits à l'échelle de l'exploitation et décrits précédemment, s'est révélée être l'option qui a le plus d'effet sur les impacts de la chaîne de valeur. La santé des hommes et des écosystèmes ainsi que la conservation des ressources seraient améliorées respectivement de 2,2 ; 9,8 et 4,8 % ; ces réductions d'impact interviennent aussi bien sur l'île qu'en dehors de l'île. Mais l'emploi dans le réseau industriel et la communauté de l'île seraient également affectés négativement de – 2,2 et – 3,0 % respectivement. Cette perte d'emplois intervient essentiellement sur l'île ; elle résulte principalement d'une réduction des quantités d'intrants consommés, transportés et donc conditionnés ou produits sur l'île. Ces résultats ont été repris par les filières pour faire de l'écoétiquetage ou argumenter auprès de la Commission européenne pour un soutien de productions animales à La Réunion. Cette étude souligne l'importance des compromis entre la dimension environnementale et la dimension socio-économique et les défis méthodologiques associés à une intégration réelle des méthodes d'évaluation issues de diverses disciplines à l'échelle de l'ensemble de la filière (Vayssières *et al.*, 2019).

Figure 3.16. Évaluation multicritère de différents impacts environnementaux, sociaux et économiques intervenant le long d'une filière animale (Thévenot, 2014).



Encadré 3.7. Proposition d'un cadre conceptuel d'évaluation de la multifonctionnalité de l'élevage au pâturage à l'échelle des territoires.

Alexandre Ickowicz, Jacques Lasseur, Bernard Hubert, Vincent Blanfort, Mélanie Blanchard, Jean-Daniel Cesaro, Jean-Pierre Müller

Dans le cadre d'un réseau international sur la revalorisation des systèmes d'élevage au pâturage intégré dans la plate-forme multiacteurs « Programme mondial pour un élevage durable » soutenu par la FAO[1], des chercheurs ont contribué avec un groupe d'acteurs à développer un cadre d'analyse et des outils destinés à faire reconnaître, à évaluer et à soutenir la multifonctionnalité (Hervieu, 2002) et les services rendus par les élevages au pâturage.

À partir d'une recherche bibliographique puis d'ateliers participatifs regroupant chercheurs, organisations d'éleveurs, décideurs locaux, acteurs des filières, nous avons identifié les impacts et les fonctions génériques et spécifiques liés aux élevages au pâturage. Sur ces bases, nous avons pu structurer une ontologie de la contribution de ces systèmes d'élevage au développement durable (Müller *et al.*, 2021) en identifiant quatre dimensions :

• une dimension production,
• une dimension environnementale,
• une dimension sociale,
• une dimension développement économique du territoire.

Ces deux dernières ont été particulièrement développées pour ces systèmes dont l'organisation socio-économique et les traditions culturelles ainsi que l'emprise sur les territoires par les pâturages et parcours sont prégnantes.

À partir de cette ontologie, un modèle conceptuel de la multifonctionnalité des systèmes d'élevage à l'herbe a été construit (figure 3.18) en identifiant dans chacune des quatre dimensions :
• les éléments du système en jeu (troupeau, éleveur, industrie, parcelle, atmosphère, sol, etc.),
• les processus/fonctions décrivant les impacts,
• et une série d'indicateurs d'évaluation multicritère.

Un guide d'application de la méthode explicite la démarche, les choix de simplification, les possibilités de complexification. Il propose une première série d'indicateurs d'efficience (exemples : production animale par hectare utilisé ; emplois créés par niveau de production ; émission de GES par hectare utilisé ou niveau de production ; augmentation du revenu moyen par famille selon le niveau de production ; nombre d'associations créées par niveau de production ; nombre d'infrastructures créées au sein du territoire par niveau de production, etc.). Ces indicateurs permettent, selon les scénarios et options choisis, de comparer et d'évaluer les impacts dans les quatre dimensions et de les affecter aux ODD. Cette démarche et ces outils ont été testés, validés et enrichis sur 6 sites pilotes à travers le monde dans des

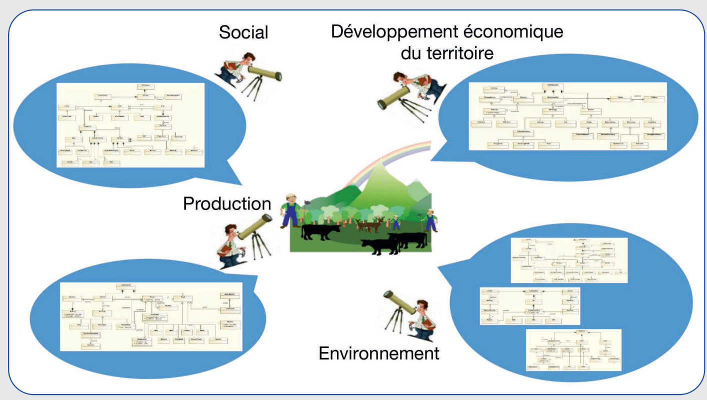
1. www.livestockdialogue.org.

Encadré 3.7. Suite.

contextes variés (Argentine, Brésil, France, Mongolie, Sénégal, Vietnam ; Wedderburn *et al.*, 2021). Ils ont conduit à identifier plusieurs domaines d'application à l'échelle des territoires : aide à la décision pour le développement de modèles d'élevage ou de filières, pour le choix de priorités d'activités en faveur du développement territorial, aide à la construction d'équipes de recherche pluridisciplinaires, etc. Ce modèle conceptuel a également abouti au développement de modèles de simulation. Leur utilisation est destinée, à travers plusieurs scénarios, soit sous forme de « modèles-jouets » éducatifs, soit sous forme de modèles spécifiques appliqués au terrain, à faciliter la discussion entre acteurs des territoires et l'identification de compromis à gérer entre plusieurs options, fonctions, indicateurs et impacts.

Cette approche de la multifonctionnalité des systèmes au pâturage permet donc de développer une approche multicritère basée sur une analyse systémique de la place de l'élevage au sein des territoires qui tient compte des interactions et compromis entre dimensions et indicateurs. Elle appelle à mobiliser un ensemble de disciplines et d'acteurs afin de rendre compte des différents points de vue et intérêts et afin de proposer collectivement les options pour un développement durable de leur territoire.

Figure 3.18. Illustration du modèle conceptuel de la multifonctionnalité des systèmes d'élevage au pâturage



Conclusion et perspectives

René Poccard-Chapuis, Vincent Blanfort, Fabien Stark, Jonathan Vayssières, Mathieu Vigne

La notion d'efficience et les usages qui en sont faits dans la sphère scientifique ont évolué au cours du temps, accompagnant les enjeux sociétaux du moment. Née avec le productivisme, au sein duquel elle constitue un indicateur technico-économique parmi d'autres pour évaluer les performances, l'efficience a pris un nouveau sens dès lors que

l'on a cherché des outils aidant à économiser des ressources, notamment énergétiques : d'abord pour leur prix, puis pour leur rareté et plus récemment pour leurs impacts sur le réchauffement climatique et l'environnement. Loin d'une notion « fourre-tout», l'efficience, en tant qu'outil d'analyse et de réflexion, peut donc s'adapter à des contextes variés et aider à répondre à de nombreux enjeux comme l'ont illustré les exemples qui précèdent.

Cette capacité qu'a la notion d'efficience à produire des indicateurs quantitatifs pertinents pour les enjeux de chaque époque est précieuse aujourd'hui en élevage. Face aux nombreuses critiques et opportunités qui traversent le monde de l'élevage contemporain, qu'est-ce que l'efficience a à nous dire ?

Sur le plan de la méthode

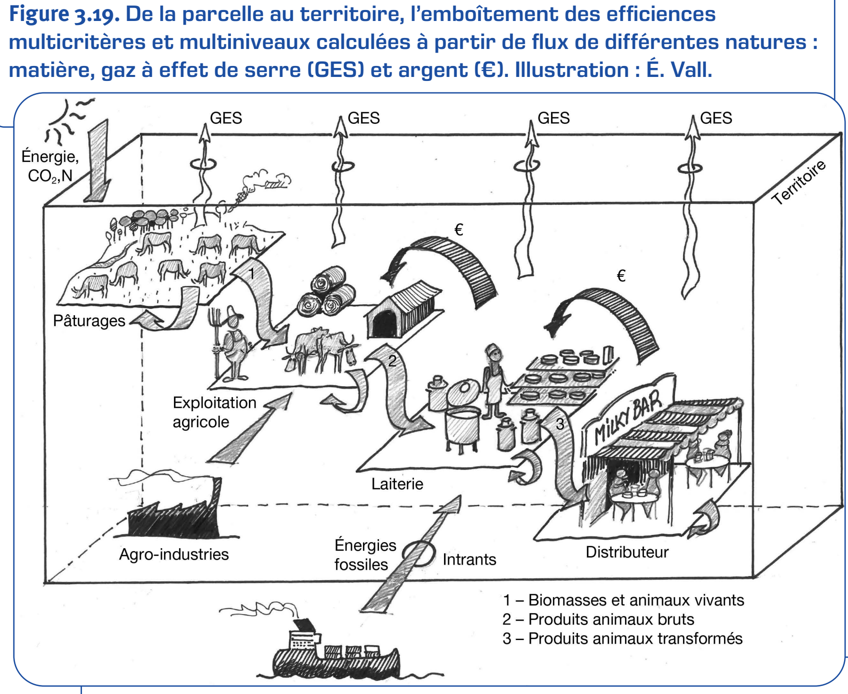
L'absence ou la rareté des références scientifiques établies, qui permettraient d'évaluer l'efficience des systèmes d'élevage tropicaux au pâturage, ressort très nettement des différents exemples. Les points de vue et analyses s'appuient donc sur des évaluations partielles, complétées par une transposition vers le Sud de données et concepts élaborés dans des élevages et des territoires du Nord. Les limites de cette approche sont claires, vu les différences à tous les niveaux : les modalités de fonctionnement des systèmes d'élevage à l'herbe sont très différentes sous les tropiques. L'enjeu méthodologique est donc primordial pour parvenir à produire ces référentiels scientifiques qui font défaut.

Ce chapitre décrit un large panel de méthodes utilisées dans l'analyse des efficiences, dans de nombreuses zones d'élevage tropical. Il montre clairement la grande plasticité de cette notion d'efficience, caractéristique essentielle pour analyser un secteur aussi divers que celui de l'élevage. De fait, les auteurs nous ont donné un aperçu de la diversité d'applications de cette notion, dans des contextes très contrastés. Une grande diversité de critères peut être intégrée dans le calcul de l'efficience de l'élevage, que ce soit en ce qui concerne les ressources mobilisées, l'énergie, les nutriments, les terres, le travail, etc., que ce soit en matière de services ou dis-services générés : nourriture, protéines, GES émis, emplois, valeur ajoutée, etc. Ce sont autant de vues possibles, chacune pouvant faire sens dans la spécificité d'une problématique ou d'une autre. Diversité aussi dans la dimension spatiale ou l'échelle d'analyse : on peut mesurer l'efficience depuis les parcelles fourragères, jusqu'aux territoires ou filières d'élevage et même au-delà. Diversité des dimensions enfin, l'efficience s'appliquant autant dans les domaines technique ou biologique et environnemental que social et économique (Figure 3.19). Tous ces leviers sont autant de possibilités pour ajuster avec précision le choix des critères, en fonction du problème posé.

Représenter au mieux la complexité à partir d'un critère simple est une autre vertu de la notion d'efficience. Les différents encadrés méthodologiques de ce chapitre illustrent la complexité des méthodes de calcul qui se cache derrière les indicateurs simples et synthétiques d'efficience. Outre ces indicateurs, on constate combien l'efficience permet de développer des raisonnements systémiques, par-delà le seul critère faisant l'objet d'une évaluation. Dans chaque étude de cas, à partir d'une équation et de son raisonnement analytique, les auteurs mobilisent, et donc questionnent, l'ensemble des facteurs



Figure 3.19. De la parcelle au territoire, l'emboîtement des efficiences multicritères et multiniveaux calculées à partir de flux de différentes natures : matière, gaz à effet de serre (GES) et argent (€). Illustration : É. Vall.



L'analyse des efficiences peut porter sur différents types de flux : de matières, de revenus, d'énergie ou encore d'émissions de gaz à effet de serre. Elle peut en outre s'intéresser à des compartiments spécifiques, comme la parcelle pâturée avec son troupeau, la ferme, la filière ou le territoire. Chacune de ces modalités traduit des points de vue et des dimensions complémentaires, enrichissant l'évaluation et permettant des comparaisons pertinentes entre fermes, régions ou systèmes d'élevage, y compris à l'échelle globale.

et mécanismes qui, en interagissant, régissent le critère ciblé. Ce regard systémique est particulièrement fécond quand il s'agit d'éclairer le fonctionnement d'activités aussi complexes que l'élevage peut l'être, notamment l'élevage au pâturage. Ainsi l'efficience en azote ne renvoie pas seulement à une équation de digestibilité ou de métabolisme, mais oblige à considérer les multiples biomasses impliquées, classer les processus de transformation dont elles font l'objet tout au long de la boucle de recyclage de la biomasse. Finalement, cela pousse à raisonner l'intégration des activités d'agriculture et d'élevage, les flux entre espaces pâturés, cultivés ou fumés et la force de travail impliquée. La profondeur du temps long peut également être appréhendée au besoin, comme en Amazonie brésilienne : analyser l'efficience des paysages dans cette région d'élevage, c'est reconstituer comment au cours du temps l'occupation de l'espace s'est d'abord basée sur des critères d'appropriation foncière, puis de réglementations environnementales et aujourd'hui d'aptitudes agronomiques des sols pour la production fourragère. C'est cet empilement d'héritages qui dessine les paysages dans lesquels évoluent les éleveurs et leurs animaux et que l'analyse d'efficience contribue à déchiffrer.

Il ne fait pas de doute que ces deux caractéristiques méthodologiques, autour de la plasticité et de la systémique, font de l'efficience une notion précieuse pour analyser l'élevage contemporain et ainsi appréhender les possibles formes d'élevage de demain. D'autant qu'il est possible de combiner plusieurs critères, ou niveaux, dans des évaluations intégratives. Les analyses multicritères et multiniveaux sont adaptées pour appréhender une troisième caractéristique fondamentale des élevages à l'herbe : leur multifonctionnalité. Celle-ci est ici abondamment illustrée, de l'Inde à l'Amazonie en passant par le delta du Nil, les plateaux de Madagascar, les collines des Cévennes et les transhumances provençales. Nulle part les élevages à l'herbe ne se limitent à la seule production de viande, lait, voire cuirs ou fibres. Suivant les environnements et sociétés dans lesquels ils s'insèrent, ces élevages assument d'autres fonctions, comme le contrôle du foncier, la constitution de patrimoines, l'épargne, l'ascension ou le prestige social, la production de multiples services ou dis-services écosystémiques. Les exemples du sous-chapitre *La recherche d'efficience pour accompagner la transition agroécologique des systèmes d'élevage* (p. 104) montrent comment l'analyse multicritère est incontournable pour rendre compte de cette multifonctionnalité et comment l'efficience peut renseigner plusieurs de ces critères. Nos travaux sur la multifonctionnalité mettent également en lumière les limites de l'analyse de l'efficience même multicritère, qui ne peut pas toujours produire les indicateurs pertinents, par exemple dans la dimension sociale. C'est l'un de nos champs de recherche, pour progresser sur la mise en cohérence des méthodes de calcul de ces indicateurs multiples.

Sur le plan de la communication

L'élevage est au cœur de nombreuses polémiques, où l'information est souvent partielle et orientée par un message partisan et où l'impartialité scientifique fait cruellement défaut. Il est régulièrement critiqué, à la suite de crises sanitaires ou environnementales notamment. En outre, des controverses nouvelles émergent et l'opinion publique questionne par exemple les risques nutritionnels liés à la consommation de viande, la production de viande artificielle ou encore les droits des animaux d'élevage. Des regards positifs sont également portés sur l'élevage à l'herbe, vantant l'intérêt de circuits courts, la contribution des éleveurs à l'entretien des paysages, la qualité gustative ou les valeurs culturelles attachées aux produits et territoires d'élevage. Dans ce contexte souvent passionné, voire conflictuel, des lobbys se structurent et des plaidoyers s'élaborent. La communication devient un enjeu, un terrain où s'affrontent des parties prenantes, et où la simplification est une stratégie voire une arme, entraînant donc des risques de désinformation.

L'efficience présente aussi des avantages dans ce domaine de la communication : elle permet de simplifier sans être simpliste, ce qui la rend précieuse pour enrichir les débats sociétaux sur l'élevage. La mise en balance entre les ressources et les résultats produits, ou entre les produits indésirables et les produits visés, sont des exercices intellectuels suffisamment simples pour être bien compris ou pratiqués et suffisamment riches pour faire réfléchir au-delà des idées reçues ou des slogans militants. Ce chapitre apporte de nombreuses illustrations qui, transposées dans le débat public, pourraient améliorer la formation des opinions, justement parce qu'elles reposent sur ces principes de simplicité,

d'intégration de la complexité, de pertinence face à la diversité des problématiques et d'objectivation de la connaissance. L'approche par les efficiences peut ainsi constituer une vraie porte de communication entre science et société.

Dans le domaine du conseil et de l'orientation des politiques

L'élevage est engagé dans de nombreuses transitions de par le monde. C'est pourquoi les éleveurs et les institutions ont besoin de critères objectifs pour prendre leurs décisions. Devant la complexité des processus, les mesures d'efficience leur permettent de mettre en balance des critères et de chercher les compromis les plus acceptables, au niveau des pratiques d'élevage notamment, mais également des politiques sectorielles ou territoriales. Les études portant sur la transition agroécologique sont particulièrement illustratives sur ce sujet. Bien que conduites dans des contextes différents, elles montrent toutes combien la mesure d'efficience permet aux chercheurs de dresser des diagnostics pertinents, d'identifier quelles pratiques ou mesures font ou feraient sens, au regard des conditions locales.

Mais ces études montrent également que ces points de vue ne sont que faiblement, ou rarement, mobilisés au-delà du cercle des chercheurs et du monde académique. Les politiques sectorielles ne favorisent pas l'efficience dans la filière laitière sénégalaise ou dans les filières viandes internationalisées d'Afrique australe. L'intégration agriculture-élevage dans le Gujarat en Inde est limitée par l'accès facile des agriculteurs aux engrais azotés. En Guadeloupe, l'intensification et la spécialisation ont été préférées à l'intégration agriculture-élevage, ce qui freine aujourd'hui la transition agroécologique. En d'autres termes, si l'intérêt des approches par l'efficience est patent, c'est leur appropriation par les acteurs politiques qui est limitée. L'enjeu est de dépasser le stade des études académiques pour que ces indicateurs soient intégrés dans les normes et standards qu'utilisent les acteurs du développement.

La finance responsable, ou finance verte, pourrait avoir ce rôle de catalyseur des transitions. Elle demande de standardiser les mesures de l'efficience dans des protocoles types et d'instituer cette démarche autour des bilans de carbone et des services écosystémiques. Mais ces orientations sont encore au stade de projets pilotes. De la même façon, dans le secteur public, les transferts de compétences vers les communes sont une tendance lourde dans les administrations du monde entier, impactant directement les bassins d'élevage. Elles offrent la possibilité aux institutions locales de choisir leurs critères d'efficience pour construire des réglementations innovantes, à leur niveau, telles que la certification territoriale. Enfin, les acteurs des chaînes de valeurs sont également attentifs et potentiellement intéressés par une mobilisation de ces indicateurs en vue de faire évoluer les filières agricoles vers des formes plus socio- et écoresponsables en cohérence avec des démarches de certification de leurs produits.

Finalement, démocratiser l'usage des mesures d'efficience semble être une priorité pour mieux communiquer sur la diversité des systèmes d'élevage et leurs contributions aux objectifs du développement durable ainsi que pour mieux conseiller les éleveurs et les décideurs. Si les méthodes d'évaluation sont riches et bien appropriées par la sphère scientifique, c'est la sphère du développement et des décideurs qui doit aujourd'hui être ciblée.

4. Des inventions et des innovations pour favoriser la contribution des systèmes d'élevage au pâturage à la transition agroécologique de l'agriculture

Mélanie Blanchard, M'Hand Fares, Éric Vall



Les systèmes d'élevage au pâturage méditerranéens et tropicaux possèdent des atouts importants pour contribuer efficacement à la transition agroécologique de l'agriculture (FAO, 2018b). Ils contribuent entre autres :

- au renforcement des moyens de subsistance des éleveurs et à la création de valeur ajoutée dans les chaînes de valeurs ;
- à la conservation et l'utilisation des services produits par la biodiversité des écosystèmes dans lesquels s'inscrivent les élevages ;
- et au recyclage des coproduits de l'élevage pour améliorer l'efficience des activités agricoles.

En 2018, la FAO a proposé un cadre original, synthétique et global des grandes valeurs qui, du moins théoriquement, caractérisent des systèmes agricoles et alimentaires agroécologiques (Wezel *et al.*, 2020). Cette approche se base sur une dizaine d'éléments interdépendants regroupés en 3 grands pôles.

- Le premier pôle concerne les propriétés intrinsèques de ces systèmes : 1) la diversité ; 2) les synergies ; 3) l'efficience ; 4) la résilience ; 5) le recyclage.
- Le deuxième pôle concerne les valeurs humaines et sociales favorables à la transition agroécologique : 6) la cocréation et le partage de connaissances ; 7) l'inclusion des acteurs ; 8) la culture et les traditions alimentaires.
- Le troisième pôle concerne les valeurs facilitant la création d'un environnement porteur pour la transition agroécologique : 9) l'économie circulaire et solidaire et 10) la gouvernance responsable.

Ces éléments précisent en quoi la transition agroécologique des systèmes agricoles renvoie à de multiples processus de changement mettant en jeu plusieurs niveaux d'échelle pour adapter, inventer et innover dans les façons de conduire les élevages.

Depuis de longues années, des travaux de recherche visent à étudier et accompagner les acteurs du secteur de l'élevage pastoral méditerranéen et tropical dans les processus de changement de leurs activités et plus particulièrement dans une perspective de transition agroécologique de l'agriculture. L'objectif de ce chapitre est de présenter les principaux résultats illustrant cette démarche.

Dans une première partie, nous reviendrons brièvement sur quelques définitions et concepts clés relatifs aux notions d'inventions et d'innovations ainsi que sur notre manière de les appréhender dans nos travaux sur les changements concernant les systèmes d'élevage au pâturage.

Dans une deuxième partie, nous présenterons un premier groupe de cinq études de cas concernant ce que nous avons qualifié « d'inventions ». Ces inventions contribuent à la transition agroécologique en élevage de plusieurs manières : en réduisant le recours aux intrants de synthèse dans la reproduction, en améliorant l'efficience du suivi des performances animales, en développant l'accès rapide à des connaissances opérationnelles en élevage sur la diversité des valeurs des fourrages et sur la gestion intégrée des plantes adventices et enfin en prenant en compte le comportement social des animaux au sein des troupeaux. Ces travaux portent sur la création :

- d'inventions prometteuses comme :
  - un dispositif numérique pour l'étude des comportements sociaux des ovins d'élevage et ses applications possibles à la gestion des animaux au pâturage et à leur santé ;
  - les applications de la spectrophotométrie dans le proche infrarouge pour la détermination rapide et à faible coût de la valeur des fourrages et des déjections animales ;
- de prototypes qui commencent à être adoptés :
  - un détecteur électronique de chevauchement des brebis permettant de se passer de la synchronisation hormonale des chaleurs en insémination artificielle ;
  - une plate-forme d'autopesée des ovins au pâturage permettant d'améliorer la précision du suivi de l'état nutritionnel des animaux en réduisant les astreintes de pesées ;
  - un portail collaboratif Web permettant de partager et diffuser des connaissances sur la gestion des adventices présents dans les écosystèmes herbagers des élevages pastoraux et agropastoraux.

Dans une troisième partie, nous présenterons des résultats de travaux portant sur l'accompagnement d'innovations à l'échelle des systèmes de production et des fermes, visant à améliorer le recyclage des déjections animales et à développer des alternatives aux aliments concentrés et à complémenter les fourrages annuels :

- l'introduction de banques fourragères arbustives dans les élevages laitiers pour améliorer l'alimentation des femelles en production en saison sèche au Burkina Faso ;
- l'appui à la production de fumure organique en fosse bord champs cultivés pour améliorer, à moindre coût, le recyclage des déjections animales et des résidus de cultures.

Enfin, la quatrième partie du chapitre sera consacrée à des innovations organisationnelles, qui concernent la mise en place d'une gouvernance locale et responsable des territoires d'élevage pour mieux gérer les ressources agro-sylvo-pastorales. Les deux premiers exemples évoquent des innovations organisationnelles pour améliorer la coopération des acteurs dans les chaînes de valeurs de produits d'élevage :

- la contractualisation pour améliorer les pratiques collectives de pâturage en champs cultivés à l'échelle du territoire ;
- des plates-formes d'innovations pour une production et une collecte de lait local plus agroécologiques et inclusives en Afrique subsaharienne.

D'autres cas abordent l'innovation organisationnelle pour une gestion concertée et durable des territoires incorporant des activités d'élevage :

- l'élaboration d'une charte foncière locale pour gérer l'accès et l'utilisation des ressources agro-sylvo-pastorales sur un territoire communal au Burkina Faso ;
- la contribution du pâturage tournant à la restauration des forêts en Amazonie brésilienne.

Qu'entendons-nous par inventions et innovations dans nos recherches sur les systèmes d'élevage au pâturage ?

Éric Vall, Mélanie Blanchard, M'Hand Fares

Inventions, innovations et processus de changement

Devenu un leitmotiv dans le processus des changements technique, organisationnel et social, et souvent synonyme du mot « progrès » qu'il a tendance à remplacer, le terme d'innovation mérite d'être précisé et remis à sa juste place dans ce processus de changement (Guellec, 2009). Selon Schumpeter (1911, 1939), ce processus de changement comporte trois phases. La première phase est celle de l'invention, qui consiste en la production de connaissances nouvelles (des idées, des théories, des modèles…). La deuxième phase fait place à l'innovation, définie comme un dispositif nouveau (produit, procédé, service ou mode d'organisation) effectivement vendu ou mis en œuvre, parfois adapté et finalement adopté par une communauté d'acteurs. La troisième phase est celle de la diffusion qui consiste en l'adoption de ce dispositif nouveau (innovation) par une grande partie de la population. L'innovation est aujourd'hui plus perçue comme un processus que comme un objet ou un produit.

Dans ce processus, la recherche, qu'elle soit fondamentale (visant à produire des connaissances) ou appliquée (ayant un objectif plus opérationnel), apparaît comme la source première de l'innovation[13]. Mais elle n'est pas la seule, car la production de connaissances

13. Au sens de Guesnerie et Hautcoeur (2003), la recherche finalisée va d'une recherche sensible aux enjeux de société (*policy relevant*) aux recherches visant directement à résoudre des problèmes pratiques, en tenant compte des principales interactions localisées qui affectent nécessairement sa définition et la mise en œuvre des solutions (*policy oriented*). Dans les deux cas, l'objectif est de produire des connaissances qui puissent être mobilisées pour une action sur le réel et obtenir un résultat pratique, contextualisé (Sebillotte, 2004 ; Guillou, 2004).



fondamentales ou appliquées peut aussi venir de l'apprentissage par la pratique (*learning by doing*), l'imitation ou l'achat de technologies par les acteurs de terrain.

En outre, les relations entre ces trois phases ne sont pas univoques. Certes, une idée nouvelle (invention) peut donner lieu à des produits ou des procédés nouveaux que l'on peut mettre en marché (innovations) et qui se diffuseront largement s'ils rencontrent une demande. Mais un procédé nouveau (innovation) peut susciter en retour une idée nouvelle (invention), tout comme la diffusion peut encourager le développement de produits nouveaux et d'idées nouvelles.

Dans le processus de changement décrit par Schumpeter, l'innovation joue un rôle de pivot central entre l'invention et la diffusion. Ces trois composantes en interaction forment un continuum systémique. Pour caractériser ces innovations, on peut opposer les innovations radicales (qui impliquent un changement d'ampleur, par exemple le téléphone portable), des innovations incrémentales (qui sont des ajustements à la marge du produit ou procédé, par exemple la dernière version d'un téléphone portable). On peut aussi distinguer les innovations de produit des innovations de procédé ou d'organisation. Ainsi, les innovations ne sont pas seulement technologiques, mais elles peuvent aussi être organisationnelles. Et le plus souvent, elles sont un hybride des deux types, à la fois technologiques et organisationnelles, et apparaissent souvent « par grappes » (Schumpeter, 1939).

Dans toute invention et dans toute innovation, il y a des composantes techniques (des objets) et des composantes organisationnelles (des sujets), mais il est bien évident que selon les inventions et les innovations la part de la technique peut être prépondérante sur la part organisationnelle (comme dans le cas du recours à un nouveau type de fourrage en élevage) et inversement (par exemple dans le cas de la mise en place de nouvelles règles de gestion des ressources pastorales d'un territoire).

En caricaturant un peu les choses, on peut dire que la recherche convertit « l'argent en connaissances » et « l'innovation convertit ces connaissances en argent» (Anandajayasekeram, 2011). Dans la réalité, ce processus suit un cheminement complexe truffé de rétroactions et de relations interactives impliquant la science, la technologie, l'apprentissage, la production, les politiques et la demande. Cette réalité du chemin de l'innovation fait que la responsabilité des organismes de recherche agronomique dans ce domaine ne s'arrête pas uniquement à la production de nouvelles technologies ou connaissances, dès lors que le succès d'une invention et d'une innovation ne peut être revendiqué que lorsque les inventions sont diffusées, adoptées et utilisées (Anandajayasekeram, 2011), c'est-à-dire lorsque l'innovation aura parcouru l'ensemble du chemin d'innovation décrit par Schumpeter.

Généralement, une invention devient une innovation réussie quand :

- elle apporte quelque chose de nouveau pour l'utilisateur,
- elle est considérée comme meilleure que l'existant,
- elle est économiquement viable et socialement souhaitable,
- elle se diffuse.

Espace et environnement des inventions et des innovations

Le processus de changement s'inscrit dans un espace et un environnement, qualifié par ses concepteurs de « système d'innovations » (Spielman, 2006.). Dans cette approche, l'invention et l'innovation sont définies comme des processus de production, d'accès et de mise en œuvre de connaissances nouvelles. Les interactions stratégiques complémentaires (positives, comme l'émergence de niches d'innovation) ou substituables (négatives, comme les phénomènes de verrouillage face au changement) et les flux de connaissances entre les différents acteurs du processus de changement sont au cœur de l'analyse. Dans le système d'innovation, l'accent est aussi mis sur l'importance du rôle des institutions pour réguler les processus d'invention et d'innovation notamment dans le domaine de l'apprentissage (par les pratiques, l'éducation et la formation, etc.) indispensable à la diffusion des innovations (Anandajayasekeram, 2011).

C'est ainsi que dans sa forme la plus simple, le système d'innovation a tout d'abord été représenté sous la forme de trois grandes composantes interagissantes (Anandajayasekeram, 2011) :

- les organisations impliquées dans la production, la diffusion, l'adaptation et l'utilisation de nouvelles connaissances ;
- les processus d'apprentissage interactif qui se produisent lorsque les organisations s'engagent dans ces processus et comment cela conduit à de nouveaux produits et processus (innovation) ;
- et les institutions – règles, normes et conventions, formelles et informelles – qui régissent la façon dont ces interactions et processus se déroulent.

Le schéma du système d'innovation correspondant à notre domaine de recherche sur les systèmes d'élevage a été représenté sur la figure 4.1. Il comprend :

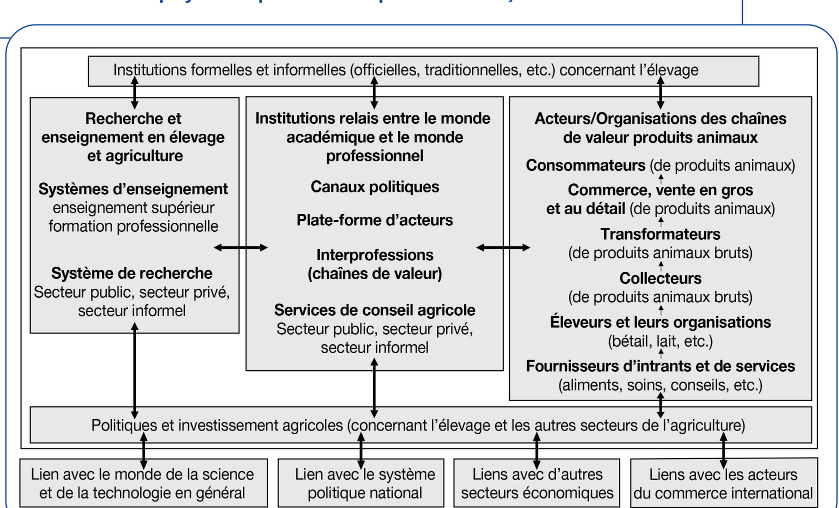
- les sources modernes et traditionnelles d'invention et d'innovation (organismes de recherche et d'enseignement en agriculture, savoirs locaux des éleveurs et des acteurs de l'élevage) ;
- les acteurs des chaînes de valeur d'élevage (des producteurs aux consommateurs, les acteurs privés, lobbys, ONG) ;
- les institutions officielles et non officielles, œuvrant dans la formulation et l'application des politiques et réglementations agricoles ;
- et à l'intersection, les organisations œuvrant dans la mise en relation et l'échange de savoirs et savoir-faire entre praticiens, décideurs, enseignants et chercheurs.

Les études de cas présentées dans ce chapitre s'inscrivent, bien évidemment, dans un tel système d'innovation avec un positionnement et des niveaux d'interactions avec les acteurs du système variable selon leur degré de développement et selon les caractéristiques intrinsèques de l'invention et de l'innovation.

Les termes de l'innovation et leur cadre conceptuel brièvement rappelés, nous présentons maintenant des exemples concrets d'inventions et d'innovations spécifiques aux systèmes d'élevage au pâturage méditerranéens et tropicaux qui renforcent leur contribution à la transition agroécologique de l'agriculture.



Figure 4.1. Schéma théorique d'un système d'innovation agricole à l'échelle d'un pays (adapté de Banque mondiale, 2006).



Des inventions pour mieux partager les connaissances et intégrer les processus naturels dans le pilotage des élevages au pâturage

Jean-Baptiste Ménassol, Denis Bastianelli, Nathalie Debus, Eliel González-García, Samantha Bazan, Thomas Le Bourgeois, Vincent Blanfort

La transition agroécologique des systèmes d'élevage, en tournant le dos à la simplification ainsi qu'à l'artificialisation des pratiques et en s'appuyant sur des processus naturels plus complexes à gérer, nécessite d'intégrer un ensemble d'informations plus vaste que dans des modes de conduite conventionnels. Par conséquent, la transition agroécologique des systèmes d'élevage requiert la mise au point de dispositifs (appareillages, plates-formes, etc.) permettant aux praticiens d'être mieux informés pour appuyer la prise de décision. Cette partie présente des travaux sur des dispositifs inventés dans des laboratoires et des stations de recherche, qui n'avaient pas toutes *a priori* vocation à devenir une innovation. Ces travaux portent principalement sur les premières étapes du chemin partant de l'invention jusqu'à l'innovation, depuis la conception de prototypes et la définition de leur utilisation par les usagers finaux jusqu'à un produit fini parfois accompagné d'un dépôt de brevet.

Des idées d'inventions prometteuses

Un dispositif numérique dédié à la caractérisation des comportements sociaux des ovins pour faciliter la gestion des troupeaux

La compréhension du comportement des animaux d'élevage est un levier essentiel pour la mise en place de pratiques d'élevage durables, notamment pour l'élevage au pâturage où les animaux bénéficient d'une liberté de mouvement importante. Elle permet de nuancer le primat de l'objectif de production en tenant compte de cette dimension essentielle du bien-être des animaux dans l'adaptation des pratiques d'élevage. La plupart des animaux d'élevage ont un fort niveau de sociabilité : le groupe est l'unité d'expression des comportements individuels procédant notamment au choix du partenaire sexuel, à la coopération pour l'accès aux ressources ou encore aux apprentissages.

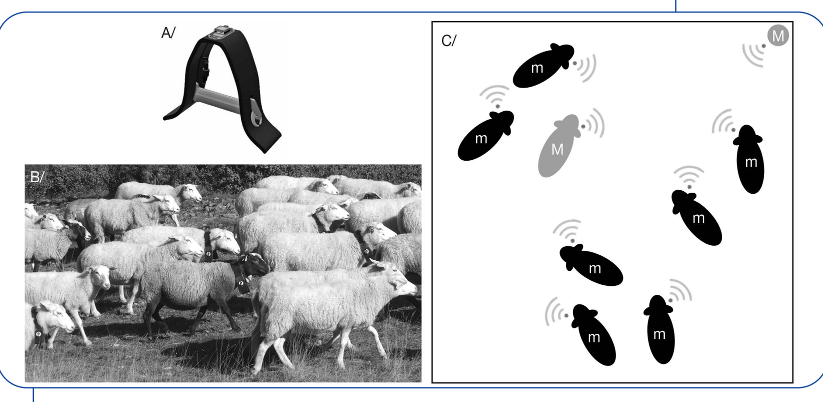
L'analyse de réseaux sociaux propose, au moyen de la construction de structures sociales complexes à partir d'interrelations entre individus, d'analyser comment les comportements individuels structurent le groupe et, en retour, comment le groupe influence les comportements individuels. Ces analyses, surtout menées chez les espèces sauvages, trouvent un intérêt particulier chez les espèces domestiques en permettant d'associer à ces deux entités (l'individu et le groupe) une tierce partie, le gestionnaire (éleveur, berger, etc.). L'analyse de réseaux sociaux peut ainsi constituer un outil au service d'un élevage de précision, permettant de coordonner les échelles individuelles et collectives. D'un point de vue de la transition vers des systèmes agricoles agroécologiques, cette méthodologie contribue notablement aux éléments du premier pôle en améliorant l'efficience et la résilience des systèmes :

- **l'efficience** en maximisant la prise d'informations et l'impact des interventions par le gestionnaire. Par exemple en étant capable d'inférer des états globaux du troupeau à partir de comportements observés chez quelques individus et inversement, ou en interprétant des structures de troupeau pour identifier des troubles actuels ou à venir sur des individus ciblés ;
- **la résilience** en favorisant une approche et des organisations sociales adaptées à l'environnement global du troupeau, dans ses composantes biotiques (incluant le ou les gestionnaires) et abiotiques. Il peut s'agir par exemple d'organisations du pâturage permettant une gestion intégrée du parasitisme, une adaptation face à la diminution de ressources ou l'augmentation de la pression de prédation.

Pour développer ce type d'outil, il est nécessaire d'acquérir une information permettant de construire de façon numérique les structures sociales complexes qui composent un troupeau. Dans notre cas, le processus de réflexion et développement vers l'invention a été motivé par l'absence de solutions existantes satisfaisantes face à nos conditions de suivis. Démarrés en 2016, ces développements itératifs entre phases de laboratoire et de terrain ont abouti à une solution fonctionnelle en 2019. L'outil numérique développé s'appuie sur un capteur radiofréquence (RF) permettant de mesurer les proximités interindividuelles (figure 4.2).



Figure 4.2. Outil numérique de détermination du réseau social d'un troupeau par la mesure des proximités interindividuelles.



(A) : rendu 3D du collier. Inspiré d'un collier à sonnailles traditionnel, la cloche est remplacée par un boîtier de batterie en PVC qui exerce un contrepoids permettant de maintenir le capteur dans son boîtier étanche en position haute (ici ouvert). (B) : photographie d'un troupeau (brebis Romane du domaine expérimental de La Fage, Aveyron). Certains individus sont équipés du capteur RF embarqué sur collier. (C) : représentation schématique de la solution embarquée. Les brebis sont équipées d'un capteur RF ou nœud mobile (m) tandis qu'un nœud de centralisation ou nœud maître (M) peut être embarqué sur un individu ou fixe en bord de parcelle. Ce dernier rythme les nœuds mobiles et stocke les acquisitions. Les proximités entre individus sont déduites de la qualité de communication RF établie entre paires de capteurs (inversement proportionnelle à la distance). Les cartes construites du réseau social du groupe sont analysées en fonction des attributs individuels et des événements environnementaux. Source : A) Théo Kriszt ; B) et C) Jean-Baptiste Ménassol.

Le développement de cet outil a été itératif. Les phases de développement *in silico* étaient prolongées par des phases de déploiement de terrain intermédiaires, sans animaux, puis de déploiements en élevage avec des durées de suivi croissantes. Le déploiement intermédiaire visait à tester les performances des parties matérielles (batterie, antennes, boîtiers...) et logicielles (programme de contrôle des nœuds mobiles et du nœud maître) du système embarqué en conditions simplifiées. Le déploiement en élevage, dans des environnements plus complexes, apportait un niveau de test plus approfondi notamment sur la durabilité des moyens d'embarquement des capteurs sur les animaux. Ces phases de déploiements combinées ont régulièrement contribué à la mise à jour matérielle et logicielle de l'outil pour s'approcher des objectifs de suivi visés. Elles ont également permis d'impliquer d'autres acteurs dans le processus de développement avec des ingénieurs et techniciens d'élevage mais également des éleveurs et bergers. Leurs apports ont été significatifs pour anticiper certains comportements des troupeaux évitant une mise en défaut du système ou encore pour valider les moyens d'embarquement et la configuration du dispositif à adopter en fonction du type de terrain. L'architecture finale de l'outil lui procure une grande adaptabilité par rapport aux contraintes de terrain en ce qui concerne l'acquisition, la transmission et le stockage des données, mais également en matière d'autonomie énergétique et de robustesse générale du dispositif embarqué.

Concernant les applications concrètes de la connaissance de la structure sociale d'un troupeau, nous avons pu mettre en place une méthode comportementale d'identification des individus les plus représentatifs des déplacements du troupeau. Cette méthode, développée dans le cadre du projet Clochète[14], permet de raisonner le choix des individus à équiper de capteurs de géolocalisation et d'activité afin de maximiser l'efficience des opérations de suivi de la mobilité et de l'utilisation des surfaces par les troupeaux pastoraux. D'un point de vue prospectif, cette méthode va également être mobilisée afin d'étudier l'adaptation des troupeaux face à une pression de prédation ou à la diminution des ressources alimentaires. Dans ces derniers cas, les résultats attendus sont la définition d'indicateurs comportementaux précoces d'altération du comportement social des individus (pouvant traduire un impact sur leur bien-être), justifiant des interventions ciblées de l'éleveur.

La spectrophotométrie dans le proche infrarouge (Spir) pour faciliter la détermination de la valeur des fourrages et la gestion des déjections animales

Dans le domaine de l'alimentation animale, les pratiques agroécologiques engendrent une diversification des ressources alimentaires, avec l'utilisation de plantes de couverture à double fin, et des modes d'exploitation moins standardisés des fourrages issus de prairies multispécifiques (Baumont *et al.*, 2008). À des fins de pilotage de l'exploitation ou de recherche sur les systèmes d'alimentation, il devient donc essentiel de caractériser des ressources fourragères hétérogènes, de manière plus fréquente, plus précise et plus réactive. L'utilisation des résultats pour la prise de décision n'est pas conciliable avec des délais d'analyses de plusieurs semaines.

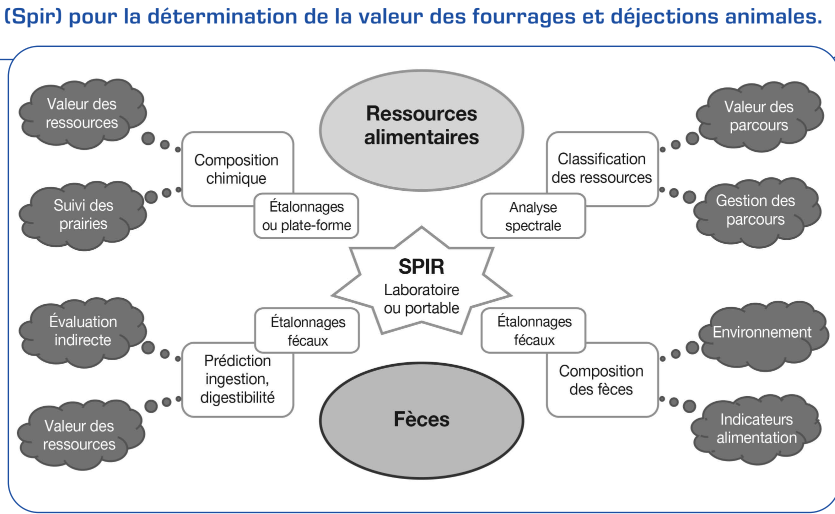
La spectrométrie dans le proche infrarouge (Spir) est un outil classique pour l'analyse rapide et peu coûteuse des aliments et des fourrages. Les longueurs d'onde dans le proche infrarouge interagissent avec les liaisons entre les atomes des molécules organiques. L'absorption de la lumière est donc liée à la quantité de liaisons chimiques et à leurs interactions. La composition chimique des échantillons est alors estimée par simple mesure instantanée d'absorption de la lumière infrarouge. Disponible en routine dans les industries de l'alimentation animale, elle n'est pas encore présente à grande échelle dans les élevages, moins encore dans les élevages extensifs et dans les pays du Sud. Cependant, d'abord conçue pour la mesure de quelques paramètres analytiques spécifiques des aliments, ses usages peuvent aujourd'hui être étendus à l'analyse de la valeur des fourrages et des déjections animales, procurant des informations très utiles pour la mise en place et la gestion de systèmes d'élevage agroécologiques (Bastianelli *et al.*, 2018).

Récemment, de nouvelles approches basées sur la Spir ont été mises en place à la suite de demandes de la recherche ou des acteurs de terrain (figure 4.3).

14. https://idele.fr/clochete/ et https://vimeo.com/561497620.



Figure 4.3. Applications de la spectrophotométrie dans le proche infrarouge (Spir) pour la détermination de la valeur des fourrages et déjections animales.



La caractérisation de milieux complexes sur parcours méditerranéens. La description d'un parcours par une liste des plantes présentes et leur valeur nutritive est inopérante pour la gestion du pâturage. À quoi peut servir, à un éleveur ou un gestionnaire d'espace pastoral, un simple tableau de composition chimique d'une centaine de « bouchées » possibles ? La Spir permet de proposer une classification de ressources alimentaires en classes fonctionnelles. Une simple prise de spectre des végétaux consommables permet de les assigner à un nombre limité de « classes fonctionnelles » et ainsi raisonner l'alimentation animale selon leurs complémentarités (aliments protéiques, de lest, etc.), indépendamment des espèces végétales présentes. L'approche, déjà utilisée dans des travaux de recherche (Azambuja *et al.*, 2020) peut être appliquée par des éleveurs ou des gestionnaires d'espaces naturels pour évaluer la valeur des parcours, les capacités de charge, voire les besoins de complémentation pour des catégories de ressources jugées déficientes dans certains milieux naturels.

Une estimation indirecte de l'alimentation des animaux au pâturage à partir de l'analyse des fèces. Les fèces donnent accès à diverses informations, depuis une simple mesure d'index alimentaires (azote, lignine) jusqu'à des prédictions de la digestibilité ou de l'ingestion, utiles pour le pilotage des systèmes d'alimentation du bétail, mais aussi de façon croissante pour des études environnementales sur la modélisation des flux biogéochimiques dans les pâturages (azote, matière organique et prédiction des GES)(Assouma *et al.*, 2018).

La mise à disposition d'une plate-forme de prédiction « DoPredict» de la valeur des aliments. Elle permet de prédire la composition et la valeur nutritive d'un échantillon,

à partir de données spectrales sans avoir besoin d'un recours à un étalonnage particulier. Le système compare le spectre à une base de référence et sélectionne les individus les plus proches pour établir un étalonnage « local ». On peut ainsi prédire la composition de végétaux moins fréquents ou de mélanges pour lesquels aucun étalonnage spécifique ne serait disponible. Cette plate-forme permet de centraliser l'opération de prédiction, en bénéficiant de bases de référence et d'algorithmes uniques, pour pouvoir décentraliser la prise de spectre et l'amener au plus près du terrain, sans avoir à transporter les échantillons eux-mêmes. Associée à des mesures par des spectromètres portables (Salgado *et al.*, 2013), cette stratégie permet une mutualisation des outils et une réactivité permettant aux éleveurs de bénéficier d'une réponse la plus rapide et la plus précise possible pour la caractérisation de leurs ressources.

Les limites de l'utilisation en élevage de la Spir restent le coût du matériel et la possibilité de mesures de terrain en direct, ce qui est de plus en plus réaliste avec les spectrophotomètres portables (Salgado *et al.*, 2013). Si les perspectives à court terme concernent davantage une utilisation par des techniciens d'élevage ou des structures d'encadrement (comme c'est le cas à la Réunion ou à Madagascar), l'utilisation directe par les éleveurs est envisageable avec la disponibilité d'appareils moins onéreux et leur mobilisation simultanée pour, par exemple, améliorer l'utilisation des ressources fourragères et la gestion des fèces dans les élevages.

Des prototypes en cours d'adoption

Le détecteur électronique de chevauchement des brebis

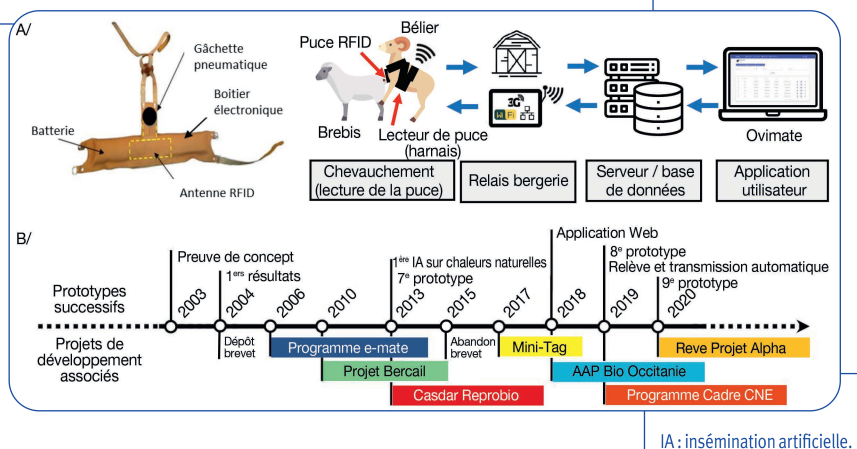
La saisonnalité de la reproduction chez les ovins est une contrainte forte en élevage. Même dans le cas de races peu saisonnées, comme la plupart des races méditerranéennes, le printemps – correspondant à la saison naturelle de repos sexuel – marque un ralentissement dans les activités de reproduction des animaux. Des programmes de traitements hormonaux ont donc été développés pour permettre une reproduction hors-saison. En accord avec les laiteries, les élevages producteurs de lait de brebis s'organisent, certains ayant recours à ces programmes hormonaux afin que l'ensemble du bassin laitier puisse produire du lait toute l'année, en particulier lors des périodes de forte demande. Un avantage indéniable de ces traitements est d'associer à un fort taux d'induction des cycles de reproduction des brebis, une forte synchronisation interindividuelle. Ils peuvent ainsi être associés à des inséminations, réalisées sur tout un troupeau et à un moment fixe. Cette pratique permet d'accéder au progrès permis par la génétique, simplifie le travail des éleveurs et limite les risques sanitaires en supprimant les échanges de béliers entre élevages. Cependant, le recours aux traitements hormonaux est aujourd'hui remis en question et déjà interdit dans les élevages biologiques, dont la part de marché est croissante. Les pratiques doivent donc évoluer afin de mieux répondre aux principes de l'agroécologie et à l'émergence de nouvelles questions éthiques en lien avec le bien-être animal et la santé publique.



Dans ce contexte, le détecteur électronique de chevauchement Ovimate a été développé comme solution alternative aux hormones en élevage ovin, tout en laissant la possibilité aux éleveurs de recourir à la pratique de l'insémination animale. Son principe de fonctionnement est basé sur le comportement naturel de reproduction chez les ovins (figure 4.4 A). Le mâle est équipé d'un harnais en cuir, embarquant un lecteur RFID (*Radio Frequency Identification*). Le chevauchement d'une femelle déclenche la lecture d'une puce RFID placée sur la queue de cette dernière. La date et l'heure du chevauchement sont ainsi compilées avec les identifiants des deux partenaires (Alhamada *et al.*, 2016). Une vidéo de présentation est disponible sur le site du réseau européen SheepNet[15]). Cet outil numérique inclut également un relais de proximité, placé dans la bergerie, permettant la récupération des données de chevauchements à distance et communiquant avec un serveur disposant d'une interface Web. L'application Ovimate permet:

- la centralisation, la visualisation et le post-traitement des données issues des harnais ;
- des échanges entre utilisateurs (chercheurs, centres d'insémination animale, éleveurs)
- et la configuration de l'ensemble du dispositif (figure 4.4 A).

Figure 4.4. (A) : le détecteur électronique de chevauchement Ovimate. (B) : son historique de développement.



IA : insémination artificielle.

D'un point de vue pratique, cet outil a vocation à être associé à la technique naturelle de « l'effet mâle ». Les mâles sont mis au contact des femelles après au moins deux mois de séparation, ce qui permet de déclencher naturellement les chaleurs en dehors de la saison naturelle. Ainsi, l'outil Ovimate permet de déterminer la cinétique d'apparition des chaleurs après un « effet mâle », en vue d'établir avec un haut niveau de précision le meilleur moment pour la réalisation des inséminations (Debus *et al.*, 2019). Ses principes

15. www.sheepnet.network/fr.

de conception offrent des opportunités d'utilisations complémentaires de l'outil dans le domaine de la gestion de la reproduction en élevage avec :

- la détermination de la motivation sexuelle des mâles selon un procédé précis et rapide (facteur 1 à 50 par rapport à la méthode actuelle ; Alhamada *et al.*, 2017a) ;
- l'utilisation comme méthode de diagnostic de gestation (Alhamada *et al.*, 2017b) ;
- et la création de calendriers des mises-bas.

Les travaux sur le détecteur électronique de chevauchement Ovimate ont montré qu'une condition essentielle de réussite des innovations associées à ces technologies tient à l'existence d'une infrastructure capable de soutenir ces déploiements, telle que le dispositif de soutien aux innovations INRAE Transfert, depuis l'optimisation des performances techniques des capteurs jusqu'à l'atteinte des objectifs de retour sur investissement. Dans le secteur agricole, la qualité de ces infrastructures reste toutefois hétérogène. Depuis l'invention d'un outil numérique jusqu'à son adoption par les utilisateurs finaux, le chemin de l'innovation technologique implique un ensemble d'acteurs, de compétences et d'intérêts différents. Le développement du détecteur a duré de nombreuses années (figure 4.4B). Ceci ne s'explique pas uniquement par le temps nécessaire pour l'optimisation des performances techniques de l'outil.

En effet, initialement, l'acceptabilité de la solution a été négativement impactée par les contraintes liées à sa mise en œuvre et son utilisation pratique, mais aussi par la perception des impacts liés à son adoption sur l'organisation du travail (Lurette *et al.*, 2016). De plus, l'engagement dans le projet des partenaires privés dépend d'un ensemble de facteurs difficilement prévisibles : évolution des attentes sociétales, changements législatifs, variation des politiques de sites (fermeture de la branche électronique de la première entreprise impliquée, importance donnée à l'élevage bio par les centres d'insémination artificielle) et des orientations budgétaires visant à répondre aux besoins des filières.

L'implication des utilisateurs finaux reste centrale dans la réussite de cette innovation, même si elle a été tardive dans le cycle de développement. Le recours à des enquêtes auprès des futurs utilisateurs et à la modélisation est également très important pour favoriser l'acceptabilité de la solution. Elle permet d'anticiper, via des simulations, l'impact de l'introduction de l'outil sur les différentes composantes du système d'élevage (biotechnique, économique, environnementale). Elle permet aussi :

- d'initier des réflexions avec les acteurs,
- de faire émerger les éventuels points de tension et d'identifier les besoins d'accompagnement,
- et de confronter différents acteurs des filières concernées.

L'élaboration conjointe de scénarios peut faire émerger des consensus et une appropriation facilitée des outils et de leurs modalités d'introduction.

Une plate-forme d'autopesée des ovins au pâturage

Le poids vif (PV) est une mesure utilisée pour le suivi fréquent de l'état corporel des animaux et pour la conduite du troupeau en général, par exemple pour piloter l'alimentation, évaluer les gains de poids, l'état de santé et la valeur bouchère ou pour établir des



calendriers d'abattage. En élevage hors sol avec des animaux enfermés, cette mesure est relativement simple, bien que chronophage et laborieuse. En revanche, la mesure et l'enregistrement du poids vif dans des conditions d'élevage au pâturage sont des tâches difficiles impliquant de contraindre les animaux, mais le poids vif reste un paramètre essentiel à suivre régulièrement. Pour surmonter cette difficulté et alimenter les recherches autour des capacités adaptatives des animaux dans des conditions contraignantes, un prototype de pesage automatisé pour les petits ruminants a été conçu et testé.

Pour ce faire, nous avons utilisé le concept d'autopesée automatique (de l'anglais *Walk-over-Weighing* qui signifie peser en marchant, WoW), combiné à l'identification électronique par radiofréquence. Le WoW a été conçu pour être léger, résistant, transportable et autonome en énergie (González-García *et al.*, 2018).

Le dispositif est composé d'un couloir léger, amovible, portable, équipé de deux barres de chargement (barres de pesée), d'un système de lecture et télétransmission des données de l'animal et d'une centrale d'énergie (panneau solaire et batterie ; figure 4.5). Le module S, situé à l'entrée du WoW, permet de faciliter le flux des animaux un par un et d'éviter ainsi l'agglutination de plusieurs animaux en même temps. Un circuit de passage volontaire et à sens unique est établi.

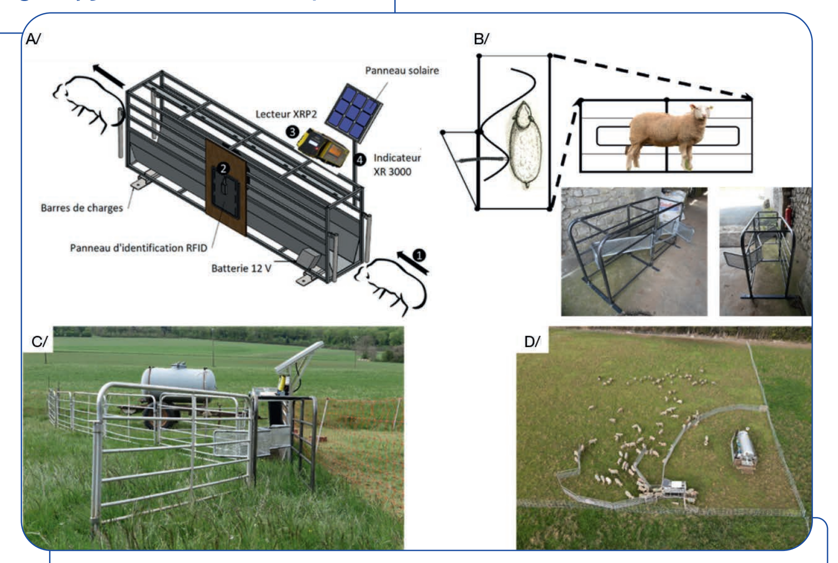
Les partenaires impliqués dans sa conception sont divers : INRAE et l'unité de recherche Selmet, porteuse du projet; le domaine expérimental INRAE de La Fage (France), unité expérimentale où les travaux se sont déroulés ; Maréchale Pesage, une société privée qui a fabriqué le prototype ; et l'institut d'Élevage (Idele) pour la diffusion chez les producteurs.

Une série d'étapes successives et complémentaires ont permis la calibration et l'évaluation du dispositif depuis fin 2015. Des éléments pratiques et théoriques autour de l'efficacité du système ont été validés dans une série d'expériences avec une gamme de situations d'élevage (à l'intérieur et à l'extérieur, intensives ou extensives, animaux de différentes catégories, de races laitières ou de viande). La phase d'adaptation (temps requis pour que les passages individuels soient volontaires), le nombre de visites quotidiennes ainsi que la proportion des enregistrements des PV biologiquement valides et interprétables ont été analysés à chaque fois. Des analyses statistiques poussées ont été nécessaires pour établir la précision, l'exactitude, la répétabilité et l'accord entre les enregistrements de PV avec le WoW et les mesures prises avec la bascule fixe ou statique (coefficient de corrélation de concordance de Lin, méthode Bland et Alman).

Les principaux résultats obtenus (González-García *et al.*, 2020b) ont permis de vérifier la précision de la pesée. Après élimination des valeurs aberrantes, on obtient une bonne concordance entre les deux méthodes (PV WoW et PV fixe) et de bons indicateurs de répétabilité, reproductibilité, précision, exactitude, accord, par rapport à la méthode dite « gold-standard » (bascule fixe ou statique). Dans l'ensemble des expériences développées jusqu'à maintenant, nous avons obtenu 65 % des lectures de PV WoW fiables (valides, utilisables) et validé l'effectivité du module *S* pour contrôler le flux. Le dressage et l'adaptation des animaux sont réussis en 2 à 3 semaines. Le passage volontaire permet de collecter 6 à 8 valeurs

de PV interprétables par animal et par jour. Le circuit « logique » est réussi et l'effectivité de la zone d'attraction est démontrée (rôle de l'eau, des sels minéraux, de l'ombre des arbres).

Figure 4.5. Plate-forme d'autopesée.



(A) : l'animal (1) traverse volontairement la plate-forme, attiré par une zone d'attraction située de l'autre côté (eau, sels minéraux, ombre des arbres) ; (2) au passage, l'antenne lit la boucle d'identification électronique (IDE) de l'animal (située sur l'oreille gauche) et envoie l'IDE de l'animal au lecteur ; (3) le lecteur enregistre l'IDE dans un fichier et l'envoie à l'indicateur ; (4) l'indicateur enregistre le poids vif de l'individu et la date et l'heure de pesée quand l'animal a quitté la plate-forme. L'opérateur télécharge les fichiers stockés (format CSV ou XLS) pour traitement et interprétation ultérieurs. (B) : dispositif de contrôle du flux des animaux (structure métallique en forme de S) placé à l'entrée de l'unité WoW. (C) et (D) : aperçus du dispositif installé dans différents systèmes de pâturage et conditions de terrain.

La pesée statique, technologie disponible à ce jour, nécessite une rétention des animaux concentrés et stressés. À l'inverse, le WoW permet la pesée des animaux de manière volontaire, fréquente et automatique sans intervention de l'opérateur. Un tel suivi automatique et continu du PV des animaux contribue ainsi au monitoring de l'état corporel du troupeau. C'est un outil d'aide à la décision pour l'éleveur et les conseillers permettant des ajustements de la conduite de l'alimentation. Enfin, le WoW a attiré l'attention des producteurs et a conforté nos dispositifs de recherches sur l'efficacité alimentaire et les capacités adaptatives sur le terrain.

Wiktrop, un portail collaboratif Web dédié à la gestion des adventices des milieux cultivés et pâturés tropicaux et méditerranéens

Dans les systèmes d'élevage mobilisant des surfaces pâturées ou récoltées, le développement des espèces adventices n'épargne aucune région du monde et représente un



enjeu pour la productivité et la pérennité des élevages au pâturage. En fonction de leur agressivité et de leur « in-appétibilité » pour le bétail, elles peuvent en effet dégrader la ressource en exerçant une compétition vis-à-vis des espèces fourragères jusqu'à les faire disparaître dans les situations extrêmes. Ces espèces peuvent également constituer une menace pour la biodiversité des milieux naturels en les colonisant. Enfin, certaines espèces peuvent se révéler toxiques, entraînant un risque pour la santé animale et humaine.

Les systèmes d'élevage au pâturage (et l'agriculture en général) sont à l'origine (volontaire ou involontaire) de nombreuses introductions et disséminations d'espèces plus ou moins envahissantes, mais en sont aussi l'une des principales victimes. Dans le cadre de la transition agroécologique et pour faire face aux changements globaux, disposer d'outils d'aide à la régulation de ces espèces constitue un enjeu de recherche et de développement pour mieux gérer la biodiversité des agroécosystèmes. La démarche requiert notamment de disposer et d'utiliser les nombreuses connaissances sur la biologie des espèces et leur comportement. La gestion de ces connaissances fait ainsi l'objet de visions renouvelées depuis une dizaine d'années, pour aller au-delà du transfert classique *top-down* d'informations techniques élaborées en « malherbologie » (science des « mauvaises herbes »). Dès les années 2010, la capitalisation et la diffusion de connaissances scientifiques ont bénéficié d'approches innovantes à partir de la démarche des données ouvertes (*open data*). La synthèse des connaissances devient stratégique et constitue un champ de recherche à part entière avec le développement de démarches issues des nouvelles technologies de l'information et de la communication comme le *text mining* et le *knowledge management system (KMS)* (Talib *et al.*, 2016 ; Girard *et al.*, 2017 dans Le Bourgeois *et al.*, 2019).

Wiktrop, pour *Weeds identification and knowledge in the tropical and mediterranean areas*, est un outil numérique directement issu de cette évolution technologique. Il se définit comme un portail collaboratif Web de partage et de diffusion des connaissances sur la gestion des adventices des milieux cultivés et pâturés tropicaux et méditerranéens (figure 4.6). Au-delà de sa fonction d'identification des espèces, il vise à développer un réseau multi-acteurs de chercheurs, agents de vulgarisation, enseignants, universitaires, citoyens et agriculteurs. L'objectif est de consolider les connaissances scientifiques et techniques existantes et de faciliter leur partage.

Ce portail s'inscrit donc dans une approche d'agriculture numérique participative où les acteurs sont appelés à contribuer au processus de partage des connaissances en postant des informations, des documents, des observations d'espèces et en discutant des problèmes et solutions avec d'autres acteurs du réseau. La philosophie de ce portail est de réunir l'expertise de la recherche, de la société civile, des technologies de l'information et du droit de l'environnement.

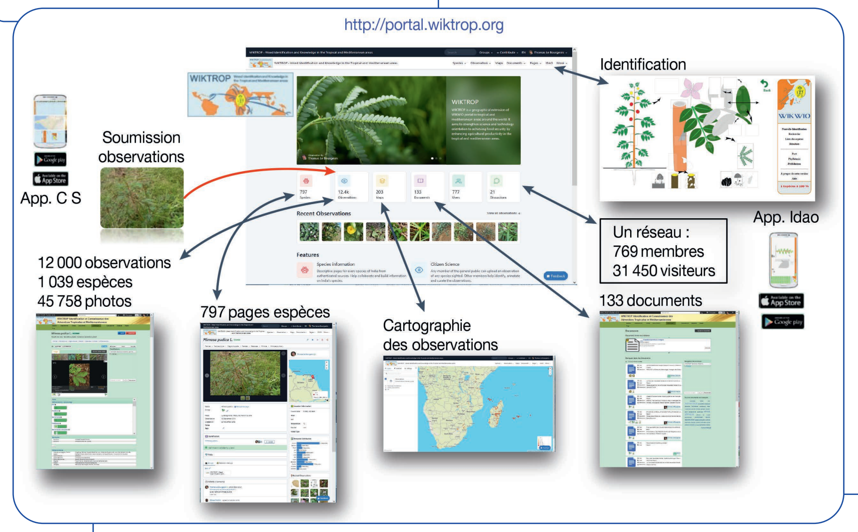
En 2014, sur la base de cette démarche horizontale, un premier portail collaboratif a été initié sur les adventices des cultures de l'océan Indien (Wikwio pour *Weeds identification and knowledge in Western Indian ocean*). Il a été développé par combinaison de plusieurs technologies préexistantes : l'*India Biodiversity Portal*[16] et l'Idao (identifica-

16. https://indiabiodiversity.org/



tion des plantes assistée par ordinateur) développée pour faciliter l'identification des plantes (Le Bourgeois *et al.*, 2008 ; 2019). Ce premier portail est devenu bilingue, puis a été associé à des applications mobiles pour la collecte d'observations de terrain et l'identification au champ. Des sessions de formation auprès de producteurs, agronomes, agents d'encadrement, enseignants, étudiants ont été accompagnées d'une enquête pour analyser les retours. Depuis 2017, le portail a été étendu à d'autres régions tropicales (Océanie, Afrique centrale et de l'Ouest, Guyane, Asie...) sous la nouvelle appellation Wiktrop. Sa gamme d'utilisation a été élargie en intégrant les écosystèmes pâturés et récoltés à partir d'un outil Idao sur les adventices et plantes à conflit d'intérêt des pâturages de Nouvelle-Calédonie (AdvenPaC ; Blanfort *et al.*, 2010).

Figure 4.6. Portail collaboratif Wiktrop.



Le portail (http://portal.wiktrop.org) est composé de : (i) un outil d'identification des plantes assistée par ordinateur (Idao) accessible aux non-botanistes ; (ii) une interface pour poster des observations et des demandes/confirmations d'identification sur photographies ; (iii) une base documentaire d'environ 800 espèces ; (iv) un système de cartographie des observations d'adventices ; (v) une interface d'échange par type de production agricole. Les fonctionnalités sont disponibles sur PC et smartphone (Wiktrop sur Google Play). Les connaissances, données, informations, médias et documents sont diffusés sur le portail sous licence Creative Commons (CC 2017).

L'intégration complète dans le portail des écosystèmes pâturés est encore en cours, mais le recul de quelques années d'utilisation dans les domaines des cultures a permis de tirer quelques enseignements. Si la majorité des utilisateurs de Wiktrop consultent le portail, la démarche de partage de données, d'informations ou de connaissances reste elle encore insuffisamment pratiquée, voire refusée particulièrement par les acteurs scientifiques et techniques. La qualité et



l'intérêt de ce portail reposent donc désormais sur une meilleure appropriation par les acteurs de cette dimension « partage », en faisant évoluer le mode d'utilisation et de contribution.

⁂

Ces travaux de recherche soulignent l'originalité et les spécificités des inventions pour contribuer à la transition agroécologique en élevage pour :

- gérer les systèmes d'élevage avec moins d'intrants de synthèse ;
- obtenir régulièrement et rapidement des informations nécessaires à la gestion complexe des systèmes d'élevage agropastoraux méditerranéens et tropicaux ;
- et mieux utiliser et gérer les ressources fourragères disponibles et les couverts herbagers.

Ces inventions contribuent à l'émergence de systèmes d'élevage plus efficients en favorisant la cocréation et le partage de connaissances.

Les innovations techniques que nous allons présenter dans la suite du chapitre mettent davantage l'accent sur le recyclage des biomasses et la diversification des ressources fourragères dans les processus de production, au cœur des recherches sur la transition agroécologique.

Des innovations techniques pour améliorer le recyclage et la diversification des ressources dans les systèmes d'élevage au pâturage

Mélanie Blanchard, Ollo Sib

L'amélioration du bouclage des cycles des biomasses et des nutriments et la diversification des ressources issues des agroécosystèmes sont deux piliers de l'agroécologie, dans lesquels l'élevage des ruminants peut jouer un rôle déterminant. En effet, par leur capacité à consommer des aliments fibreux (par exemple de l'herbe et de la paille) et des sous-produits et déchets (par exemple des eaux grasses), les ruminants utilisent de la biomasse que les humains ne peuvent pas manger, augmentant ainsi l'efficacité d'utilisation des ressources naturelles. Toutefois, si de nombreux travaux conduits en station de recherche ont montré comment l'agroécologie permettait de produire davantage tout en minimisant les externalités négatives (environnementales, sociales, économiques), les taux d'adoption de ces pratiques restent souvent limités et soulignent l'importance de mieux accompagner les acteurs dans l'adaptation de leurs pratiques à ce nouveau paradigme en fonction des caractéristiques locales de leur système d'élevage. C'est ce que cette partie du chapitre illustre à travers la présentation de deux études de cas, de la traque aux pratiques innovantes à la mesure des premiers impacts en s'appuyant sur des dispositifs de co-conception participatifs.

Les banques fourragères arbustives, une innovation prometteuse pour les systèmes agropastoraux laitiers en Afrique de l'Ouest

Dans les systèmes agropastoraux d'Afrique de l'Ouest, la productivité laitière des vaches demeure faible et irrégulière en partie à cause de la faible couverture de leurs besoins nutritionnels pendant l'année. L'alimentation des vaches repose essentiellement sur la combinaison :

• des pâturages naturels dont la productivité de biomasse de qualité est faible et saisonnière,
• et des résidus de cultures, pâturés au champ ou stockés sur l'exploitation, composés majoritairement de pailles à faible valeur nutritive.

Pour intensifier la production de lait afin de répondre à la demande des laiteries et des consommateurs, quelques éleveurs ont adopté des cultures fourragères (herbacées) en complément de ces ressources. D'autres ont recours aux aliments concentrés, chers et peu accessibles, dont la forte utilisation présente des risques potentiels pour la santé des animaux. La recherche d'options alternatives pour combler les lacunes existantes en matière d'alimentation et de productivité constitue une priorité pour les éleveurs, les acteurs de la chaîne de valeur lait et la recherche-développement. Les alternatives à promouvoir doivent être productives, durables et abordables pour les éleveurs à faibles revenus afin de renforcer l'autonomie de leur exploitation.

Une alternative prometteuse, expérimentée dans plusieurs régions tropicales plus humides (Amérique latine, Océanie, Caraïbes, Asie…) est basée sur une intégration agroforesterie-élevage. Elle consiste à introduire dans les exploitations d'élevage différentes strates et espèces d'arbres et d'arbustes à usages multiples, à différentes densités, pour l'alimentation du bétail.

Dans le contexte des savanes d'Afrique de l'Ouest, le rôle des arbres et arbustes fourragers spontanés pour nourrir le bétail en saison sèche est bien documenté. En milieu naturel, l'exploitation parfois trop intensive des rameaux et branches des arbres et arbustes fourragers (*Kaya senegalensis*, *Pterocarpus erinaceus*, etc.) pour alimenter le bétail entraîne une diminution de la ressource. L'agroforesterie, à travers la technique dite de banque fourragère arbustive à haute densité de plants, est une solution intéressante. Elle permet d'intensifier la production fourragère de qualité pour améliorer l'autonomie fourragère, réduire la dépendance des exploitations vis-à-vis des aliments concentrés, accroître les productions et les revenus des éleveurs et améliorer la biodiversité végétale et faunistique dans les exploitations. En outre, grâce à la richesse des fourrages ligneux en protéines et en tanins, la banque fourragère arbustive est une option pour assurer un apport protéique aux animaux, limiter les émissions des gaz à effet de serre et renforcer la résilience des systèmes d'élevage face au changement climatique.

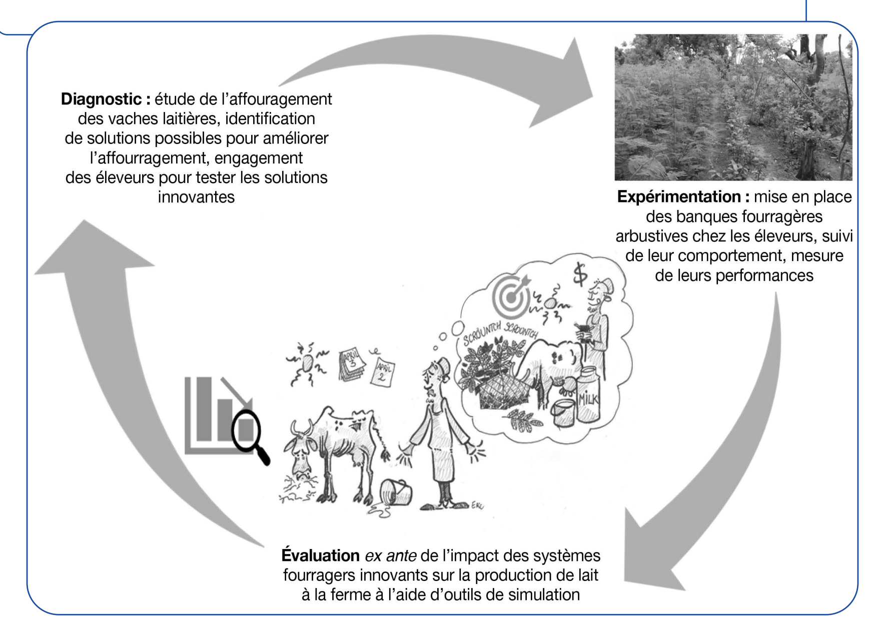
L'idée d'introduire des banques fourragères arbustives à haute densité (20 000 plants/ha) dans les systèmes agropastoraux de l'ouest du Burkina Faso est née des projets en partenariat entre l'UMR Selmet et les organisations professionnelles avec qui elle travaille depuis des années sur les questions d'intégration agriculture-élevage. Cette initiative visait à répondre à la demande des éleveurs de l'ouest du Burkina Faso d'une intensification durable et à faible coût de la production du lait local.

L'introduction des banques fourragères arbustives s'est appuyée sur une démarche itérative de co-conception afin de l'adapter aux multiples contraintes techniques, socio-économiques et aux savoirs locaux des éleveurs (Sib *et al.*, 2020 ; figure 4.7). Les éleveurs et les acteurs des filières ont participé au diagnostic initial des systèmes



d'élevage au moyen d'enquêtes individuelles et de restitutions en groupe pour identifier les pratiques d'affouragement des animaux sur parcours, en fonction des saisons, et analyser les solutions d'amélioration possibles. La banque fourragère arbustive a été présentée comme une solution potentiellement d'intérêt et des éleveurs volontaires se sont engagés pour l'expérimenter dans leur exploitation. Pour accompagner ces éleveurs dans l'apprentissage de cette nouvelle technique, un cadre de concertation a été mis en place sur chaque site et animé par la recherche, les éleveurs, les services techniques décentralisés, les collectivités locales, les autorités coutumières et les laiteries. Les ateliers participatifs ont permis progressivement d'apprendre les principes théoriques des banques fourragères arbustives et d'adapter l'innovation au contexte local et aux contraintes des éleveurs.

Figure 4.7. Processus de co-conception d'une innovation consistant en l'introduction des banques fourragères arbustives dans les systèmes agropastoraux laitiers de l'ouest du Burkina Faso (source : Ollo Sib).



La banque fourragère arbustive participe à la diversification du système fourrager des élevages laitiers et à l'amélioration de leur autonomie fourragère, avec plus de 10 tonnes $MS \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ de fourrage de qualité (protéine brute > 20 % MS). Elle contribue à leur résilience face aux contraintes d'accès aux pâturages naturels, à une meilleure qualité nutritionnelle des rations des vaches laitières, avec la digestibilité de la matière sèche et la matière organique entre 65 et 81 % et une croissance de la productivité des vaches (+ 1 ou 2 litres par vache par jour) tout en réduisant potentiellement les émissions de méthane entérique.



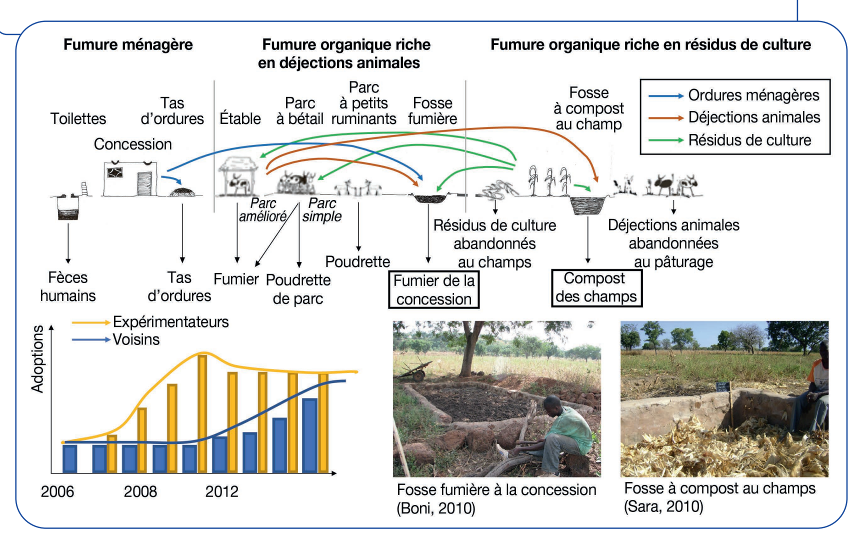
« De la traque à l'impact » des pratiques innovantes de gestion des fumures organiques dans les systèmes agropastoraux de l'ouest du Burkina Faso

La baisse de la fertilité des sols des savanes d'Afrique de l'Ouest hypothèque la durabilité des systèmes de production dans un contexte d'augmentation de la démographie, des surfaces cultivées, de l'élevage et de la pression sur les ressources naturelles. À l'ouest du Burkina Faso, les techniques de production de fumure organique ont été peu adoptées, en raison de contraintes de transport et de main-d'œuvre ainsi que de subventions aux engrais minéraux. Une faible proportion des coproduits de l'agriculture et de l'élevage étaient valorisés et la fumure produite restait de mauvaise qualité.

La co-conception de pratiques innovantes (Vall *et al.*, 2016a) a été initiée pour améliorer quantitativement et qualitativement la fumure organique produite dans cette zone. La démarche a débuté par une phase de *problématisation* avec l'étude des problèmes de gestion de la fertilité des sols avec les acteurs concernés afin d'identifier la volonté de changement portée par les acteurs et l'intention de recherche sur les pratiques innovantes.

Une *conception « pas à pas » d'innovations* a été initiée (figure 4.8). Des études des savoirs locaux sur la gestion de la fertilité des sols au Mali-Sud (Blanchard *et al.*, 2013) et des pratiques atypiques au Burkina Faso (Blanchard *et al.*, 2017) ont permis d'identifier un corpus de connaissances techniques originales et locales sur la gestion de la fertilité des sols et le recyclage des coproduits de l'agriculture et l'élevage nécessitant peu

Figure 4.8. Diversité des pratiques de gestion des fumures organiques dans les exploitations et deux modèles innovants proposés à l'adoption : la fosse fumière et la fosse à compost en bord de champ.



Fosse fumière à la concession (Boni, 2010)

Fosse à compost au champs (Sara, 2010)



d'investissement. Ces études ont permis d'identifier des solutions possibles pour améliorer la gestion de la fertilité des sols. L'innovation proposée aux paysans burkinabè visait à augmenter la production de fumure organique en la répartissant entre la concession, avec une fosse fumière, et les bords des champs, avec une fosse à compost en bord de champ. Les options, qui ont retenu l'attention des acteurs, ont été expérimentées en station et chez des agriculteurs volontaires. Les itinéraires techniques permettant d'assurer la qualité du compost tout en minimisant l'investissement en travail (hachage des tiges de coton, arrosage, retournement) ont été définis en station. Plus de 1 200 *expérimentations chez et par les agriculteurs* ont permis d'évaluer en situation réelle, la qualité et les performances des fosses fumières et des fosses à compost. Enfin, des essais d'application raisonnée de la fumure au champ ont permis de quantifier les impacts de différents modes d'application sur les rendements et les performances économiques. Après chaque cycle d'expérimentation, *un bilan* a permis de mettre en débat les résultats obtenus afin de décider de réajustements, de l'organisation de nouvelles expérimentations ou au contraire de la clôture du processus de conception si les objectifs étaient atteints.

Pour mettre en œuvre cette démarche, des *partenariats spécifiques* ont été formalisés. Les agriculteurs désireux de changer leurs pratiques, les conseillers agricoles chargés de l'encadrement agricole et les chercheurs ont formé des *comités villageois*, en charge d'animer la démarche et de mettre en œuvre les activités. Un *comité de pilotage* regroupant les représentants des institutions de recherche, de développement et des producteurs décidait des orientations stratégiques, validait la programmation et gérait les arbitrages éventuels. Un cadre éthique et des organes de gouvernance ont défini les rôles et responsabilités de chacun dans cette phase de co-conception (Vall *et al.*, 2016a).

La production de fumure organique multifosses permet d'améliorer le recyclage des coproduits des fermes en répartissant la production entre concession et champ. Elle assure la qualité du fumier et du compost produit, sans investissement conséquent en matériel, en transport et en travail. Elle n'implique pas d'arrosage, de hachage des tiges de coton ou de retournement, si la décomposition démarre en saison des pluies et si les fosses sont couvertes, pour un cycle de production de 12 mois.

Le fumier est issu de déjections des animaux stabulés, mélangées à des refus fourragers et des ordures ménagères. Le compost est produit par décomposition de tiges de coton, autrement brûlées, et d'un peu de déjections animales pour lancer la décomposition. Des recommandations ont été formulées pour la production de fumure afin d'assurer une bonne qualité (teneur minimum en déjection, couverture de fosses) ainsi que pour son application au champ selon la qualité de la fumure (compost *versus* fumier). Le suivi de la mise en place de ce processus dans les fermes et une étude d'impact *ex post* (Vall *et al.*, 2016b) ont permis de comprendre l'adoption de l'innovation et ses impacts. L'innovation a eu un effet positif sur l'économie des fermes (gain compris entre 21,2 à 51,3 €/ha), l'entretien de la fertilité des sols (11 tMS/ha contre 5 auparavant), la stabulation des animaux, mais aussi une augmentation du travail (installation, production, vidange, transport) et de la pression sur les coproduits avec la création de marchés de la fumure.

Lors de ce processus d'adoption, les paysans ont adapté les pratiques proposées à leurs propres capacités de production, en ajustant notamment la taille des fosses à la quantité de coproduits disponibles, en l'adossant à un parc à bétail ou à un biodigesteur. L'adoption s'est maintenue et a même pris de l'ampleur après l'interruption du projet (Vall *et al.*, 2016b) avec une adoption par les paysans voisins de ceux ayant participé au projet. Les échanges de savoir-faire se sont appuyés sur les réseaux des comités villageois, mettant en avant l'importance de la formalisation du partenariat dans les démarches de conception d'innovation.



Ces études de cas illustrent différentes façons de valoriser les savoirs locaux des éleveurs dans la gestion des ressources de leur agrosystème en notant leur contribution au bouclage des cycles pour l'entretien de la fertilité du sol tout en limitant la mobilisation de capitaux, et en renforçant la place de l'arbre dans les systèmes fourragers grâce à l'application des principes de l'agroforesterie à l'élevage familial. Si ces recherches permettent de produire assez rapidement des connaissances sur les savoirs locaux des éleveurs, leurs pratiques et leurs déterminants, leur contribution aux changements de pratiques prend généralement plus de temps pour y parvenir, comme cela a été montré lors des travaux sur la fumure organique.

Si le caractère technique de l'innovation signe généralement le changement de mode de production, ce changement est toujours associé à des changements organisationnels (et parfois même institutionnels) nécessaires à la diffusion et à l'appropriation de l'innovation par ses utilisateurs.



Des innovations organisationnelles pour accompagner la transition agroécologique dans les territoires et les chaînes de valeur de produits animaux

M'Hand Fares, René Poccard-Chapuis, Éric Vall

La création d'un environnement économique et politique porteur est une condition nécessaire à la mise en place d'une transition agroécologique des systèmes d'élevage. À l'échelle des filières et des chaînes de valeur de produits animaux, cela suppose une évolution vers des systèmes économiques prenant davantage en compte les valeurs de circularité dans les échanges et de solidarité entre les acteurs. À l'échelle des territoires, cela suppose la mise en place d'une gouvernance plus responsable de la gestion des ressources agro-sylvo-pastorales. Ces évolutions reposent sur des innovations organisationnelles mobilisant les acteurs du secteur de l'élevage et des secteurs associés. Cette partie du chapitre présentera des travaux d'accompagnement:

- d'éleveurs et d'agriculteurs européens désireux de contractualiser sur de nouvelles formes d'interactions entre agriculture et élevage sur un territoire ;
- d'acteurs des filières laitières en Afrique de l'Ouest ;



• d'acteurs d'un territoire d'Afrique de l'Ouest qui s'engagent à la formulation d'une charte foncière locale de gestion des ressources ;
• et d'acteurs du secteur de l'élevage de la région de Paragominas au Brésil engagés dans des actions collectives de restauration des ressources pastorales.

Des innovations organisationnelles pour améliorer la coopération des acteurs dans les chaînes de valeur de produits d'élevage

Co-conception de contrats formels pour un pâturage en champs cultivés

Le pâturage en fin d'hiver de céréales destinées à une récolte en grain ou d'un couvert végétal, comme en viticulture, est une technique ancienne pratiquée dans plusieurs régions du monde (Canada, Brésil, Australie, bassin méditerranéen…). Abandonnée en Europe au milieu du XX[e] siècle à la suite de l'introduction massive d'intrants de synthèse en agriculture, elle suscite depuis quelques années un regain d'intérêt de la part de certains cultivateurs et éleveurs confrontés au changement climatique et à la nécessité de réduire l'usage d'intrants, notamment chimiques. Pour l'éleveur, elle constitue une ressource fourragère supplémentaire bienvenue, notamment pour augmenter leur autonomie fourragère ; pour le cultivateur, pâturer la céréale ou le couvert végétal présente l'intérêt de réduire la pression des adventices et des maladies, le risque de verse, mais aussi de fertiliser le sol et de dynamiser la plante grâce au stress de pâturage.

Dans le cadre du projet de recherche européen H2020 DiverImpacts[17] sur la diversification des cultures, une association d'agriculteurs (le collège des producteurs) et le centre de Recherches agronomiques en Wallonie (CRA-W) d'une part, et le Copyc (la commission ovine des Pyrénées centrales) qui gère les projets de développement des éleveurs en Occitanie d'autre part, nous (unité Selmet, INRAE) ont sollicités pour le développement d'une contractualisation entre éleveurs et cultivateurs, engagés dans des pratiques agroécologiques sur un même territoire. Face au développement de contrats informels (accord verbal), les acteurs du secteur ont souhaité en effet introduire des contrats de pâturage plus formels (écrits) afin de sécuriser la relation existante et renforcer la coopération entre cultivateurs et éleveurs. Comme ces contrats formels sont assez nouveaux, nous avons développé, avec les acteurs, une méthode expérimentale pour leur conception.

La méthode d'expériences en choix discrets (*Discrete Choice Experiments*) est une méthode expérimentale d'évaluation de pratiques environnementales (Hanley *et al.*, 2001). Contrairement à d'autres méthodes, elle permet d'évaluer des dispositifs innovants qui ne sont pas ou peu diffusés auprès des acteurs. Dans le domaine agricole, cette méthode a récemment été appliquée à des innovations organisationnelles comme les contrats agroenvironnementaux (Mamine *et al.*, 2020).

L'objectif de cette méthode est de révéler les préférences d'acteurs confrontés à une innovation, à travers une expérience prenant la forme d'un questionnaire composé de cartes de choix. Le plus difficile dans le processus de conception de cette expérience est

17. www.diverimpacts.net.



la définition du nombre optimal de cartes représentant, dans notre cas, les attributs ou les dimensions les plus pertinentes du contrat entre éleveur et cultivateur.

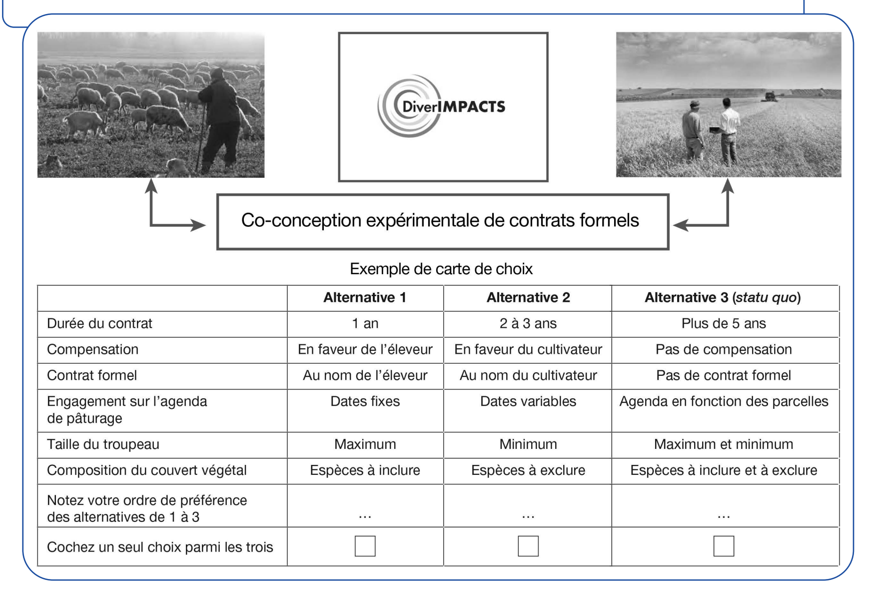
La mise en place d'un processus de co-conception au sein d'un *focus group*, composé d'experts et de parties prenantes au contrat, répond à cette contrainte. Le recours à une approche *Product Service Systems* (PSS) nous a en outre permis d'expliciter :

- les différents types de services écosystémiques rendus par l'introduction de moutons utilisés comme substituts à l'usage d'intrants chimiques (ou mécaniques) afin d'éliminer le couvert végétal (cultures intermédiaires ou adventices) d'un champ cultivé (Mamine et Fares, 2021) ;
- et les dimensions contractuelles cruciales pour la relation comme la durée, la compensation monétaire entre éleveurs et cultivateurs, la nature formelle ou informelle du contrat, la taille du troupeau, la composition du couvert végétal, etc. (figure 4.9).

Une fois ce contrat expérimental co-conçu, nous en avons testé la validité sur une population d'individus plus large. Nous avons pour cela mené une enquête auprès de 10 éleveurs et cultivateurs en Wallonie (5 céréaliculteurs, 5 éleveurs) et 7 en Occitanie (3 céréaliculteurs, 2 viticulteurs et 2 éleveurs).



Figure 4.9. Co-conception d'un contrat formel entre éleveurs et cultivateurs dans le cadre du projet Diverimpacts (Collège des producteurs, Wallonie recherche CRA-W, Copyc, Selmet).



	Alternative 1	Alternative 2	Alternative 3 (*statu quo*)
Durée du contrat	1 an	2 à 3 ans	Plus de 5 ans
Compensation	En faveur de l'éleveur	En faveur du cultivateur	Pas de compensation
Contrat formel	Au nom de l'éleveur	Au nom du cultivateur	Pas de contrat formel
Engagement sur l'agenda de pâturage	Dates fixes	Dates variables	Agenda en fonction des parcelles
Taille du troupeau	Maximum	Minimum	Maximum et minimum
Composition du couvert végétal	Espèces à inclure	Espèces à exclure	Espèces à inclure et à exclure
Notez votre ordre de préférence des alternatives de 1 à 3	…	…	…
Cochez un seul choix parmi les trois	☐	☐	☐

Les résultats de notre expérience de choix montrent que les barrières à l'adoption ne sont pas si nombreuses, contrairement à d'autres systèmes (Meynard *et al.*, 2018), et qu'une forme de coopération peut émerger car l'éleveur comme le cultivateur y ont un intérêt commun.



L'exercice de co-conception d'un contrat formel demeure néanmoins intéressant car il permet de renforcer le développement de la coopération entre les acteurs. Nous observons en effet une préférence significative pour des contrats plus formels puisque 90 % des personnes enquêtées souhaitent des contrats de plus long terme (> 1 an), 60 % préfèrent des contrats écrits… Ces clauses permettent de sécuriser la relation existante entre les deux parties et de fonder la coopération sur une relation de plus long terme, cela même si ces contrats formels ne donnent pas nécessairement lieu à des compensations monétaires entre les parties ou un engagement ferme soit sur la surface / l'agenda de pâture, soit sur la taille du troupeau.

Il existe cependant des différences régionales dans les choix de contractualisation. En Occitanie, on note une préférence pour des contrats de court terme. De même, on trouve plus souvent, surtout en viticulture, un engagement formel sur la taille maximale du troupeau ou l'agenda du pâturage ainsi qu'une demande de garantie sur l'état de la ressource alimentaire (avant le passage des animaux) ou, à défaut, une compensation monétaire.

Le contrat formel ainsi co-conçu, doit être vu comme une innovation organisationnelle jouant le rôle de support de développement de pratiques agricoles innovantes ; à la fois celles du cultivateur (introduction d'un système diversifié à bas intrant) et celles de l'éleveur (nouvelle forme de transhumance et de pâturage de son troupeau). En effet, le contrat formel assure la crédibilité des engagements entre les deux partenaires et donc l'émergence d'une coopération durable, qui leur permet de profiter sur la durée de gains mutuels à l'échange générés par ces pratiques innovantes. Autrement dit, innovations de pratiques et innovations organisationnelles vont de pair et doivent donc être pensées conjointement pour assurer la transition agroécologique.

Des plates-formes d'innovation pour améliorer la production et la collecte de lait local en Afrique subsaharienne

Aujourd'hui, en Afrique subsaharienne, la demande en produits laitiers augmente en raison de la croissance démographique et de l'émergence d'une classe moyenne. De nombreuses unités de transformation du lait ouvrent. Cependant, ces laiteries rencontrent des difficultés à s'approvisionner en lait local. Ces difficultés sont liées au volume, à la régularité et à la qualité. Leur approvisionnement est affecté par de multiples contraintes telles que le faible rendement laitier des vaches locales, la saisonnalité de la production, la fragmentation de la production entre les petites exploitations, les coûts de collecte élevés et la dégradation de la qualité microbienne du lait durant le transport vers la laiterie. Le recours à la poudre de lait est donc fréquent, soit temporairement dans les périodes de pénurie de l'offre locale (saison sèche), soit, et c'est bien souvent le cas, toute l'année.

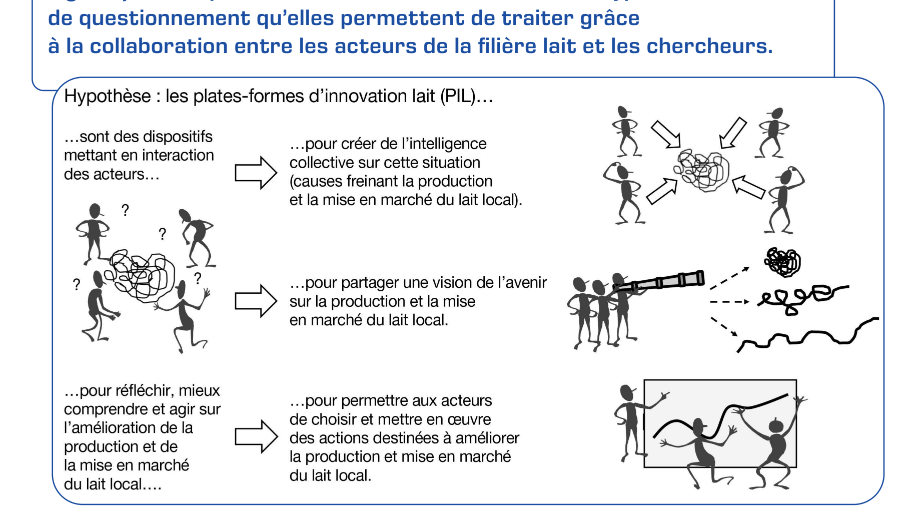
C'est dans un tel contexte qu'un projet de recherche[18] a été mené en soutien à la co-conception et la mise en œuvre d'innovations techniques et organisationnelles pour augmenter et sécuriser l'approvisionnement local en lait, considérant le potentiel d'intensification agroécologique de la production laitière et le développement de systèmes de collecte efficients et inclusifs.

18. Projet Africa-Milk, www.africa-milk.org/.

Pour la conception des innovations, le projet s'appuie sur des plates-formes d'innovation lait (PIL). Une PIL est un dispositif regroupant sur un territoire les laiteries, les producteurs de lait, les collecteurs, l'agro-industrie, les acteurs du secteur laitier et les chercheurs désireux d'apporter des solutions aux problèmes rencontrés dans la production et la mise en marché du lait local.

Les acteurs des PIL sont au cœur d'une situation problématique, qu'ils cherchent à comprendre (recherche de l'intelligibilité), dont ils veulent prévoir les évolutions possibles (recherche de la prévisibilité) et parmi lesquelles ils souhaitent réaliser des options choisies pour garantir la durabilité de leur activité (recherche de la faisabilité) (figure 4.10).

Figure 4.10. Les plates-formes d'innovation lait et les types de questionnement qu'elles permettent de traiter grâce à la collaboration entre les acteurs de la filière lait et les chercheurs.



La PIL est animée par un facilitateur et un bureau est élu pour prendre en charge l'animation de la PIL et répartir le travail. La recherche, qui *a priori* n'a pas de conflit d'intérêts avec les acteurs des PIL, apporte un appui méthodologique et scientifique pour organiser la participation, étudier les systèmes de production et de mise en marché du lait ainsi que fournir des outils de simulation.

Six PIL œuvrant dans 3 pays – le Sénégal (2 PIL), le Burkina Faso (2 PIL) et Madagascar (2 PIL) – ont été mises en place. Selon les cas, les PIL impliquent soit une laiterie, soit les laiteries de la zone d'intervention. Les laiteries sont de tailles très différentes (incluant aussi bien des minilaiteries avec moins de 500 l/j que des laiteries industrielles avec plus de 11 000 l/j).

La réflexion sur l'analyse de la situation initiale est alimentée par un diagnostic sur l'état des systèmes de production du lait et du système de collecte du lait (cartographie du



bassin de collecte, étude de la filière d'approvisionnement et des pratiques de collecte, identification des problèmes locaux de production et de mise en marché du lait).

Les acteurs locaux ont généralement une stratégie et des actions en cours pour améliorer la production et la mise en marché du lait (installation de minifermes au Sénégal, mise en place de centres de collecte au Burkina Faso et Sénégal, amélioration du contrôle de la qualité du lait à Madagascar, mise en place de systèmes de paiement du lait liés à la qualité au Kenya…). Cependant, ils ont parfois du mal à s'accorder sur la mise en place d'une stratégie conciliant les intérêts de toutes les parties (producteurs, collecteurs, transformateurs). Pour élaborer une vision collective de l'avenir, nous nous appuyons sur des outils de modélisation (outils de simulation multiacteurs territorialisés, Cesaro, 2021 ; CLIFS : *Crop livestock farm simulator* ; Le Gal, 2021 ; Zoungrana, 2020) ou des jeux sérieux (Co'ssam ; Sow, 2020) pour élaborer des scénarios et discuter des sorties des modèles avec les acteurs des PIL durant des ateliers de scénarisation.

Les acteurs locaux rejoignent les PIL principalement pour améliorer le revenu tiré du lait et des produits laitiers. La recherche leur propose de les accompagner dans cette perspective, tout en réfléchissant à la mise en place de pratiques respectueuses de l'environnement (*business* vert), inclusives (*business* social), avec une répartition juste de la valeur ajoutée (*business* équitable). C'est par rapport à ce type de préoccupation que les méthodes participatives et les outils de scénarisation facilitent grandement les interactions entre des acteurs des filières lait (qui échangent généralement assez peu) et les exercices d'anticipation et de projections de leur activité dans l'avenir. Les PIL facilitent l'inclusion et la prise en compte des préoccupations d'acteurs qui sont souvent marginalisés dans les chaînes de valeur comme les productrices de lait et les jeunes.

En théorie, les PIL sont parées de multiples vertus (participation, inclusion, prise en compte du développement durable…) (Davies *et al.*, 2016), mais en pratique, parce que les acteurs qui les rejoignent n'ont pas tous les mêmes intérêts, parce qu'ils ne parlent pas tous le même langage, parce qu'il y a des situations de forte asymétrie entre les acteurs, parce qu'il n'est jamais facile de se défaire de ses préjugés, ce sont des dispositifs qui demandent un gros effort d'animation pour créer de la confiance entre les acteurs, confiance qui est à la base de la production des effets escomptés. Autrement dit, cela demande du temps et beaucoup d'énergie, de savoir-faire et de diplomatie pour parvenir à un résultat. La recherche est souvent à l'origine de la mise en place de tels dispositifs. Mais l'expérience montre qu'il est très important, pour le succès d'une plate-forme, que des acteurs de terrain reconnus par leurs pairs prennent le relais dans l'animation de ces dispositifs, pour que l'ensemble des acteurs se l'approprie.

Finalement, les PIL sont des dispositifs intéressants pour les acteurs de terrain et pour la recherche, en tant que lieu de rencontre entre une volonté de changement (portée par les acteurs) et une intention de recherche (portée par les scientifiques). Dans nos travaux de recherche sur la transition agroécologique dans les systèmes d'élevage au pâturage, les PIL peuvent ainsi être considérées comme des laboratoires vivants (*living-labs*). Elles permettent de tester et d'élaborer à la fois des pratiques et des systèmes d'élevage innovants et de faire

se rencontrer les parties prenantes pour discuter des adaptations nécessaires afin de permettre l'appropriation des innovations souhaitées par les acteurs et leur mise à l'échelle.

Des innovations organisationnelles pour une gestion concertée et durable des territoires incorporant des activités d'élevage

Une charte foncière locale pour une gestion durable des ressources agro-sylvo-pastorales : le cas de la commune de Koumbia au Burkina Faso

Dans les territoires de l'ouest du Burkina Faso, tant que la pression anthropique est restée faible, les règles coutumières ont permis d'assurer une exploitation durable des ressources naturelles. Mais l'augmentation sans précédent de la population et des activités agro-sylvo-pastorales dans ces territoires a rendu ces dispositifs traditionnels caducs. Les textes officiels (code forestier, code de l'environnement, code pastoral, etc.) méconnus des populations restaient peu appliqués. La mise en place des communes rurales en 2006 puis la promulgation de la loi 034 portant sur le régime foncier rural en 2009 ont offert la possibilité aux collectivités locales de prendre en main la gestion de leurs ressources agro-sylvo-pastorales par l'élaboration de chartes foncières locales (CFL).

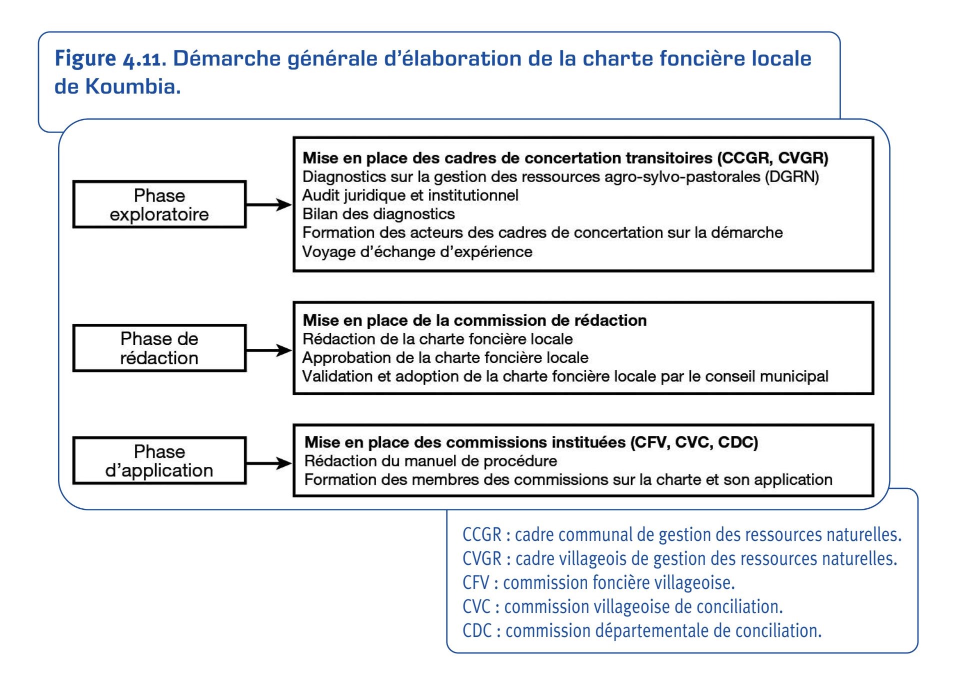
La commune rurale de Koumbia, située au cœur de la zone cotonnière, composée de 14 villages sur 1 358 km² de savanes (dont 30 % de forêts protégées), dont l'agriculture et l'élevage sont les deux activités dominantes et qui a vu sa population tripler au cours des dernières décennies, réclamait ardemment la mise en place de mesures pour freiner la dégradation des ressources et la montée des conflits liés à leur usage. En 2008, le conseil communal de Koumbia, qui avait inscrit dans son plan de développement la mise en place de mesures pour réguler et pacifier l'usage des ressources naturelles de la commune, a saisi l'opportunité d'un projet de recherche-développement (Fertipartenaires, 2008-2012) pour être accompagné dans l'élaboration et la mise en place d'une CFL (Vall *et al.*, 2015) afin de définir des règles d'accès et d'usage des ressources adaptées au contexte local, conformes au cadre réglementaire, acceptables pour les utilisateurs des ressources dans leur diversité.

L'élaboration de la CFL a pris deux années (2008 à 2010) et a nécessité de multiples négociations entre acteurs à différents niveaux de décisions (le village, la commune, la province). Au cours de ce processus, plusieurs groupes d'acteurs ont participé à l'élaboration de la CFL : les élus locaux et les conseils villageois de développement, les usagers (agriculteurs, éleveurs, pêcheurs, chasseurs, bûcherons, etc.) – autochtones ou allochtones, souvent organisés en associations –, les acteurs institutionnels (services techniques chargés de l'environnement et du cadre de vie, de l'agriculture et de l'élevage, etc.), les opérateurs privés exploitant les ressources (concession de chasses, orpailleurs...), la recherche (Cirdes et Cirad) et un cabinet de juristes spécialisés en environnement.

L'élaboration de la CFL reposant sur des principes de participation et d'inclusion a comporté trois grandes phases : phase exploratoire, phase de rédaction de la charte et phase d'application (figure 4.11).



Figure 4.11. Démarche générale d'élaboration de la charte foncière locale de Koumbia.



CCGR : cadre communal de gestion des ressources naturelles.
CVGR : cadre villageois de gestion des ressources naturelles.
CFV : commission foncière villageoise.
CVC : commission villageoise de conciliation.
CDC : commission départementale de conciliation.

Au terme de ce processus, le conseil communal de Koumbia a adopté la CFL en 2010. Elle comporte 56 articles répartis en 7 chapitres :

1. Dispositions générales
2. De l'accès à la terre
3. De la gestion des espaces et ressources agricoles, hydrauliques et halieutiques
4. De la gestion des espaces et ressources pastoraux
5. De la gestion des espaces et ressources forestiers et fauniques
6. Des organes chargés de la mise en œuvre de la CFL
7. Dispositions finales et modalités d'application

Le quatrième chapitre de la CFL, qui concerne les ressources pastorales, comporte 14 articles portant sur les règles d'accès et d'utilisation des ressources pastorales (pâturages, points d'eau, axes de circulation, gestion des feux, gardiennage…). Dans ces articles, les savoirs locaux des éleveurs ont été pris en compte, et notamment la nomenclature des saisons et des pâturages en *fulfuldé*, dans le but d'améliorer la compréhension et l'applicabilité de la CFL. Dans une perspective de transition agroécologique, la reconnaissance et la valorisation des savoirs locaux sont souvent utiles pour favoriser l'appropriation des résultats et les processus de changement. Concernant cette charte, la prise en compte de cette nomenclature locale des saisons et des espaces avait pour but

de rendre les règles d'utilisation des espaces et ressources plus compréhensibles par la population locale en désignant des entités que les populations reconnaissent pour la gestion de leurs activités au quotidien.

Mais la mise en place de la CFL s'est heurtée à plusieurs problèmes liés à la crise politique que le pays a traversée de 2011 à 2014. L'État n'a pas pu installer les agents des services fonciers et n'a pas été en mesure de promulguer tous les décrets d'application de la loi 034 ; le conseil municipal impliqué dans l'élaboration de la CFL a été dissous. À ce jour, la CFL, bien que reconnue au journal officiel, n'a pas été véritablement mise en place.

Le processus participatif de co-conception de la CFL a permis d'enrôler les acteurs et de parvenir à l'adoption de la CFL, moyennant la mise en place de comités de concertation impliquant plusieurs niveaux d'échelle (villages, commune et province).

La mise en place de nouvelles règles collectives peut être limitée par des facteurs agissant à un niveau d'échelle supérieur. C'est pourquoi l'élaboration de la CFL a impliqué des acteurs intervenant aux échelles de la province et de l'État pour la mise en cohérence des règles locales avec les dispositions nationales et internationales.

Dans la phase d'élaboration de la CFL, la recherche a apporté des outils de diagnostics scientifiques (concernant la gestion des ressources naturelles, l'analyse des savoirs techniques locaux) et d'ingénierie (gestion de la participation) pour accompagner les acteurs (alimenter les échanges par des faits, faciliter les négociations).

La mise en place d'un tel dispositif qui touche à la gouvernance d'un territoire dépend de nombreux éléments de contexte (notamment politiques, sociaux et réglementaires). C'est ainsi que l'existence d'un cadre juridique a grandement facilité l'élaboration de la CFL, tandis que les événements de 2011 à 2014 ont suspendu son application (car à la suite de la révolution de 2014, les mairies et les conseils municipaux avec qui nous avions travaillé ont été révoqués et les agents des services fonciers chargés de l'application de la loi 034 n'ont jamais opéré sur le terrain). Cependant, la prise en compte des savoirs et usages locaux des éleveurs et agriculteurs ainsi que leur implication dans la formulation des articles de la CFL ont permis de construire un document dans lequel ils se reconnaissent et qui a du sens pour eux.

Comme cela a été souligné précédemment, les événements survenus après 2012 n'ont pas permis d'achever la mise en place de la CFL et de voir ses effets et ses impacts dans le temps. Toutefois, il existe au Sahel des expériences plus réussies qui montrent que ce type d'innovations organisationnelles locales permettent d'améliorer la gouvernance d'un territoire et l'utilisation de ressources naturelles (Djiré et Dicko, 2007).

Quand le pâturage tournant participe à la restauration des forêts : itinéraire d'une innovation territoriale en Amazonie brésilienne

Avec ses 86 millions de bovins élevés sur 70 millions d'hectares de pâturages, l'Amazonie brésilienne est devenue en cinquante ans l'un des plus grands bassins d'élevage au monde, au détriment de la forêt. Certaines ressources naturelles renouvelables y sont



plus abondantes qu'ailleurs, comme le rayonnement solaire, la pluviométrie et les sols profonds. Elles peuvent permettre d'entretenir des niveaux élevés de fertilité des sols et de productivité des pâturages, si l'éleveur applique des techniques adéquates.

Pourtant, ce ne sont pas ces atouts agronomiques qui expliquent le vif succès de l'élevage mais plutôt ses fonctions sociales, particulièrement précieuses sur les fronts pionniers de déforestation. Conduit de façon extensive, l'élevage permet de s'approprier et de valoriser à moindre coût de grandes surfaces foncières, plus vite que d'autres usages des sols, tout en s'affranchissant du manque chronique de main-d'œuvre, des carences en infrastructures de production, commercialisation, transformation et transport des produits agricoles. Ainsi, l'élevage extensif a contribué à viabiliser les exploitations familiales des fronts pionniers d'Amazonie (Ferreira, 2001).

Hostiou (2003) a cependant montré le revers de la médaille : les pratiques extensives ne permettent pas de maintenir la fertilité accumulée dans les sols par la forêt. Les prairies sont alors rapidement envahies par des arbustes et le classique recours au feu est un remède pire que le mal : il accélère l'épuisement des sols et pousse l'éleveur à déforester toujours plus, pour compenser la dégradation et maintenir sa production (tout en augmentant son patrimoine foncier). Durant les cinquante années de cette course à la terre, les déforestations furent systématiques : les forêts étaient de simples réserves de fertilité, pour une éphémère production fourragère.

Comment stopper cet immense gaspillage des ressources naturelles ? Comment utiliser avec efficience leur potentiel agronomique, sans perdre les fonctions sociales de l'élevage, pour en faire une activité durable et adaptée au milieu amazonien ? L'exemple de la commune de Paragominas montre qu'une telle transition ne dépend pas que des éleveurs : les institutions territoriales doivent aussi s'organiser.

L'État fédéral brésilien a planté un jalon fondateur, en empêchant la déforestation à partir de 2005 dans toute la région : la fonction d'appropriation foncière de l'élevage extensif est ainsi désactivée et la dégradation du sol ne peut plus être compensée par l'ouverture de nouvelles parcelles. L'éleveur est obligé de gérer ses ressources, au risque de voir sa production chuter. Plassin (2018) a alors diagnostiqué une évolution fondamentale dans les stratégies spatiales des éleveurs : en abandonnant leur logique extensive, ils prennent désormais en compte les aptitudes des sols, pour concentrer sur les meilleures parcelles leurs efforts de restauration et d'intensification fourragère. Les autres parcelles, trop pentues, mal drainées ou sujettes à l'érosion, font l'objet de déprises progressives : une nouvelle trame forestière peut s'y reconstituer, capable de produire à nouveau des services écosystémiques autour de la biodiversité, du cycle de l'eau et du carbone, comme l'a mesuré Pinillos (2021b).

Dans la commune de Paragominas, ce constat a permis de donner un nouveau souffle à la protection des forêts : on comprend désormais qu'elle n'est plus incompatible avec l'élevage bovin, mais qu'elle y est au contraire associée. Dans le cadre du plan d'Intelligence et de Développement territorial décrété en 2019, c'est une nouvelle politique

territoriale d'élevage qui se met en place autour de deux ressorts : la finance verte et la gestion municipale (Poccard-Chapuis et al., 2021).

Pour démocratiser l'intensification fourragère et ainsi donner plus d'ampleur à la recomposition des paysages, le crédit est un levier précieux s'il est à la portée du plus grand nombre. La Banco da Amazônia s'est engagée aux côtés du Cirad et du syndicat des éleveurs pour concevoir et lancer en 2021 une nouvelle ligne de crédit, réservée à l'intensification écologique des pâturages et privilégiant une technique simple et accessible à tous : le pâturage tournant (figure 4.12). En outre, pour la première fois, les financements sont basés sur une typologie d'éleveurs et sont conditionnés à une formation préalable : il s'agit de minimiser les risques d'échecs potentiellement liés à la difficile transition entre systèmes extensifs et systèmes gérés.

Figure 4.12. Technique du pâturage tournant.



Cette technique où les bovins sont concentrés dans des parcs de petite taille, avec une rotation rapide d'un parc à l'autre en fonction de la repousse d'herbe, n'est praticable que sur les meilleures parcelles. Conséquence de cette innovation clé : une réorganisation spatiale des pâturages avec une déprise sur les parcelles moins favorables qui se reforestent. Une nouvelle trame forestière se forme au-delà du cadre imposé par la loi, grâce au processus d'intensification de l'élevage. De nouveaux paysages émergent, dessinés par les aptitudes du sol, intégrant des mosaïques de parcs fourragers et une trame forestière recomposée.

Le deuxième axe est conduit par la mairie, pour dresser un plan municipal d'usage des sols en fonction des aptitudes du milieu. Composée d'une cartographie au 1/25 000 et d'une loi municipale, cette réglementation décentralisée sert à orienter précisément les éleveurs dans leurs activités d'intensification et de recomposition de paysages ainsi qu'à mesurer à l'échelle de la commune les progrès du territoire en matière de restauration



forestière et d'efficience dans l'usage des sols. Un label territorial est envisagé pour attester en toute transparence de ces progrès dans l'aménagement du territoire et ainsi attirer d'autres investisseurs responsables en quête de durabilité.

Cette trajectoire d'innovation montre l'intérêt des multiples itérations autour d'opportunités, de contraintes et de réglementations, pour transformer des problèmes antagoniques en une solution commune. Le développement de l'élevage et la protection des forêts produisent ensemble des paysages efficients, sous l'égide des pouvoirs publics locaux et avec le concours de la sphère financière. Le territoire, ici communal, est bien le niveau d'organisation où ces itérations ont pu être fructifiées et déboucher sur ce nouveau paradigme pour le développement durable en Amazonie. Mais pour intéresser durablement les filières et investisseurs, l'expérience doit atteindre une masse critique et engager des communes voisines : un niveau supérieur d'organisation doit être pensé, comme celui de communautés de communes.



La création d'un environnement porteur de la transition agroécologique en élevage à l'échelle des territoires (gouvernance responsable) et des chaînes de valeur de produits animaux est très certainement aussi importante que la mise au point d'inventions et d'innovations à caractère plus technique proposant aux éleveurs des performances plus intéressantes que les pratiques d'élevage conventionnelles. Cependant, de nombreux leviers doivent être activés (mise en place d'infrastructures, d'organisations, de flux de formation et de financement ainsi que de nouvelles réglementations, etc.), impliquant un grand nombre d'acteurs du système d'innovation (figure 4.1) ; ce qui représente un travail de longue haleine. Dès lors, une des questions qui se pose concerne la place de la recherche dans ces dynamiques d'innovations organisationnelles, particulièrement complexes à mettre en œuvre.

Discussion et conclusion

Éric Vall, Mélanie Blanchard, M'Hand Fares

En quoi ces travaux sur l'invention et l'innovation dans les systèmes d'élevage au pâturage contribuent-ils à la transition agroécologique ?

Si l'on se réfère à la grille d'analyse de la FAO sur les valeurs de l'agroécologie (Wezel *et al.*, 2020), les onze études de cas que nous venons de présenter mettent en lumière les contributions suivantes des systèmes d'élevage au pâturage à la transition agroécologique (tableau 4.1) :

- Les recherches sur les inventions se positionnent sur cinq valeurs de l'agroécologie, au premier rang desquelles se trouvent la cocréation, le partage des savoirs et l'efficience, suivis des valeurs de diversité et de résilience. Le partage et la cocréation de savoirs



Tableau 4.1. Analyse des onze études de cas au prisme des dix éléments de l'agroécologie définie par la FAO (Wezel *et al.*, 2020).

Éléments de l'agroécologie proposés par la FAO	Partie 1 : des inventions					Partie 2 : des innovations techniques		Partie 3 : des innovations organisationnelles			
Étude de cas (*)	EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6	EC7	EC8	EC9	EC10	EC11
1. Diversité	×				×	×		×	×	×	×
2. Cocréation et partage des savoirs	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
3. Synergies						×	×	×	×	×	×
4. Efficience	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
5. Recyclage							×		×	×	
6. Résilience					×	×	×	×	×	×	×
7. Valeurs humaines et sociales									×	×	×
8. Traditions culturelles et alimentaires											
9. Gouvernance responsable								×	×	×	×
10. Économie circulaire et solidaire								×	×		

Légende : (*) intitulés des études de cas
EC1. Dispositif numérique pour l'étude des comportements sociaux des ovins d'élevage et applications à la gestion des animaux au pâturage
EC2. Applications de la spectrophotométrie dans le proche infrarouge pour la détermination de la valeur des fourrages et des déjections animales
EC3. Détecteur électronique de chevauchement des brebis permettant de se passer de la synchronisation hormonale des chaleurs en insémination artificielle
EC4. Plate-forme d'autopesée des ovins pour le suivi de l'état nutritionnel des animaux sans astreintes
EC5. Portail Web de partage des connaissances sur la gestion des adventices présentes dans les pâturages
EC6. Banques fourragères arbustives pour mieux alimenter les vaches laitières en saison sèche au Burkina Faso
EC7. Fosses fumières en bords de champs pour améliorer le recyclage des déjections sans astreintes au Burkina Faso
EC8. Co-conception de contrats formels pour un pâturage en champs cultivés
EC9. Plates-formes d'innovations pour une production et une collecte de lait local plus agroécologiques et inclusives
EC10. Charte foncière locale pour gérer l'accès et la gestion des ressources agro-sylvo-pastorales de la commune de Koumbia au Burkina Faso
EC11. Pâturage tournant pour aider à la restauration des forêts en Amazonie brésilienne

s'incarnent dans des objets alliant les savoirs et savoir-faire des acteurs de terrain aux dernières avancées du numérique pour une gestion plus efficiente des animaux, des troupeaux et des ressources pastorales. En effet, un objectif commun à ces inventions a trait à l'amélioration de l'efficience du pilotage des troupeaux et à l'utilisation de la diversité des ressources des agroécosystèmes d'élevage (animaux, plantes, sol, eaux…). Il s'agit d'éviter la surexploitation et l'épuisement de ces ressources, sans augmenter les contraintes pour les éleveurs. Cela grâce à :

– un accès rapide à des connaissances utiles sur les ressources ;
– des dispositifs d'automatisation du relevé de données nécessaires à la prise de décision ;
– et des outils permettant de réduire le recours aux intrants de synthèse, voire de les retirer des systèmes d'élevage (élimination des hormones grâce au détecteur de chaleur des brebis).

• Les recherches sur la co-conception pas-à-pas de systèmes d'élevage innovants, appliquées aux innovations techniques concernant le recyclage des fumures organiques et la biodiversification des systèmes fourragers, se positionnent sur six valeurs de l'agroécologie au premier rang desquelles se trouvent la cocréation et le partage des savoirs, l'efficience et les synergies, suivies des valeurs de résilience, de diversité et de recyclage. Dans ces travaux, la cocréation et le partage des savoirs sont réalisés dans des dispositifs de recherche participatifs permettant de valoriser les pratiques et les savoirs locaux des éleveurs et de les impliquer dans la construction d'innovations techniques (banques fourragères arbustives, fosses fumières de bord de champ). Dans les travaux présentés, l'objectif est une gestion plus efficiente des ressources de l'exploitation (coproduits de l'agriculture et de l'élevage, plantations d'arbres, main-d'œuvre) et une augmentation de l'efficience et de la résilience face aux chocs économiques (volatilité du prix des aliments du bétail et des engrais minéraux), grâce à un renforcement des synergies entre les activités d'élevage et d'agriculture présentes sur les exploitations, la biodiversification des systèmes fourragers et le recyclage en fumure organique des coproduits de l'agriculture et de l'élevage.

Dans les travaux de recherche sur les innovations organisationnelles concernant les systèmes d'élevage au pâturage, à la fois dans les chaînes de valeur et dans les territoires, on retrouve dans une large mesure six des valeurs de la grille FAO sur l'agroécologie. Quatre d'entre elles, à savoir la cocréation et le partage de savoirs, la valorisation de la diversité au sens large (des ressources, des acteurs…), le renforcement des synergies (entre les composantes et les acteurs des systèmes agricoles et alimentaires), sont des valeurs communes à ces études de cas. Leur mobilisation a pour but de faire émerger des chaînes de valeur animales ou des dispositifs de gestion des territoires agropastoraux plus efficients en matière d'utilisation des ressources et plus résilients face aux chocs économiques et environnementaux. Mais une caractéristique fondamentale de ces études de cas sur les innovations organisationnelles est la prise en compte d'autres valeurs telles que les valeurs humaines et sociales (inclusion des acteurs, notamment les plus petits éleveurs, des minorités et des femmes), la gouvernance responsable de territoires et l'action collective à travers la construction d'une économie solidaire et circulaire au niveau

d'un territoire. Ceci témoigne de l'importance qui est accordée dans ces cas d'étude à l'accompagnement des acteurs des territoires et des filières dans la construction d'un environnement porteur de la transition agroécologique en élevage.

Limites, points d'amélioration et perspectives de recherches sur l'invention et l'innovation pour la contribution des élevages au pâturage à la transition agroécologique

Il ressort des études de cas présentées (tableau 4.1) que des efforts de recherche sont nécessaires sur des innovations améliorant la contribution des systèmes d'élevage au pâturage à certaines valeurs de l'agroécologie telles que : le recyclage (des coproduits et des effluents des élevages tels que les déjections et les GES), les valeurs humaines et sociales (comme les questions d'inclusion des femmes et des jeunes dans les chaînes de valeur), les traditions culinaires et alimentaires (comme la valorisation des produits animaux locaux dans les chaînes de valeur) et enfin l'économie circulaire et solidaire (développement de chaînes de valeur concernant la valorisation des coproduits de l'élevage et renforcement de la place des femmes et des jeunes dans la gouvernance des chaînes des produits animaux).

Concernant la diffusion des pratiques innovantes de recyclage dans les systèmes d'élevage au pâturage, il importe de développer à l'échelle de la ferme des outils de conseil individuel sur les bonnes pratiques de recyclage et à l'échelle du territoire des outils de modélisation de scénarios de pratiques collectives innovantes. Les travaux de modélisation de Grillot (2018a) réalisés en Afrique de l'Ouest sur les territoires agropastoraux du pays Serrer ont montré l'intérêt de la modélisation pour simuler et mieux comprendre les effets et impacts de la réorganisation du cycle des nutriments à l'échelle du territoire. En 2022, des travaux de recherche étaient également en cours au Burkina Faso et au Sénégal pour utiliser des modèles dans une optique de conseil aux producteurs (conseil pour l'alimentation des vaches laitières et pour la gestion des coproduits de l'agriculture et de l'élevage). Ces modèles utilisent peu de données d'entrée et permettent de délivrer rapidement un conseil adapté aux besoins des producteurs (conseil quantifié sur la composition des rations intégrant le pâturage, information sur la part de coproduits non valorisés et conseil pour améliorer la valorisation en fourrage et en fumure de ces coproduits non valorisés). On pourrait aussi imaginer des systèmes d'information aux producteurs de ces élevages pour les aider à gérer les périodes et les lieux d'épandage des fumiers et lisier en fonction des conditions météorologiques, de la topographie du sous-sol afin d'éviter la pollution des nappes phréatiques et des cours d'eau.

Concernant la mise en place des principes d'une économie circulaire dans les systèmes d'élevage au pâturage, la modélisation pour l'accompagnement des acteurs des territoires joue un rôle essentiel dans l'élaboration de scénarios d'implémentation de pratiques collectives innovantes fondées sur des schémas d'économies circulaires. Cela concerne notamment la gestion des biomasses produites par l'élevage et l'agriculture dans un territoire comme l'île de la Réunion en utilisant le logiciel Ocelet (Vigne *et al.*, 2021a).



La transition agroécologique dépendra aussi beaucoup de l'aval des filières et donc des modes de consommation. Concernant les produits animaux, il y a très souvent beaucoup d'attentes des consommateurs, notamment des citadins, pour retrouver un accès à des produits animaux traditionnels, de qualité sanitaire satisfaisante et à un prix abordable. La valorisation de ces produits va requérir la mise en place d'innovations organisationnelles dans les filières d'élevages classiques pour répondre aux nouvelles demandes sur les produits animaux (paiement du lait à la qualité par exemple, indications géographiques, etc.).

Enfin, la prise en compte des valeurs humaines et sociales comme la dignité, l'équité, l'inclusion et la justice ressort peu des études de cas présentées, alors que ces dimensions sont bien présentes dans la vision actuelle de la transition agroécologique (Wezel *et al.*, 2020). Les femmes et les jeunes sont souvent plus sensibles aux effets de ces crises et leur place et leur rôle dans les systèmes alimentaires et agricoles concernant l'élevage et les produits animaux devraient être davantage pris en compte (Quisumbing *et al.*, 2014). Des modes d'élevage plus agroécologiques, nécessitant souvent moins de moyens financiers que les modes d'élevage conventionnels classiques, peuvent aider les femmes en zones rurales à acquérir davantage d'autonomie et de pouvoir au sein du foyer, en leur donnant la possibilité d'intégrer des groupes de producteurs, des associations de femmes commerçantes… pour mieux garder le contrôle de la vente de leurs produits comme le lait par exemple (Valdivia, 2001).

Leçons tirées des études de cas pour la conception et l'accompagnement de la transition agroécologique appliquées aux systèmes d'élevage au pâturage

Dans la présentation des études de cas, les innovations sont réparties dans deux grandes catégories : les innovations techniques et les innovations organisationnelles. Les inventions et innovations techniques ont été principalement analysées à l'échelle de l'animal, du troupeau ou du système de production en fonction des contraintes de l'éleveur. Les innovations organisationnelles ont été principalement étudiées au niveau de la chaîne de valeur ou du territoire d'élevage pour faire face aux problèmes des éleveurs, mais aussi des autres acteurs du territoire ou des chaînes de valeur. Dans la réalité, les innovations techniques impliquent forcément des innovations organisationnelles, et inversement, par effet en cascade. Par exemple, la pratique de l'insémination engendre des modifications dans le champ organisationnel de la gestion de la reproduction. Dans l'accompagnement de la transition agroécologique, les dimensions techniques et organisationnelles de l'innovation doivent être prises en compte simultanément.

L'analyse du processus de conception d'innovations technique ou organisationnelle en élevage confirme le rôle central des dimensions participatives et itératives. L'implication de l'utilisateur final dans le processus de conception est essentielle pour ajuster, calibrer et expérimenter les innovations en fonction des problèmes pour lesquels elles sont conçues et qui pourraient évoluer au fil du temps du projet. Selon le stade de développement et les caractéristiques des innovations, les principaux acteurs impliqués et les

méthodes mobilisées dans le cycle de conception diffèrent. Les inventions reposent principalement sur une étape de prototypage. L'implication des utilisateurs finaux n'intervenant que plus tard, lorsque l'invention se transforme en innovation. L'exploration de solutions peut être basée sur des approches participatives ou résulter de l'expérimentation ou d'expériences similaires apportées par la recherche. L'expérimentation, telle qu'elle est pratiquée dans les sciences biotechniques, peut-être compliquée et coûteuse. Lorsqu'il s'agit de nouvelles chaînes de valeur et de nouveaux outils organisationnels, les méthodes en matière d'expériences de choix ou de simulation constituent des alternatives pour explorer un plus large éventail de solutions. L'étape d'évaluation fait toujours partie du processus mais diffère en ce qui concerne l'objet évalué (innovation, processus, impact).

Selon les caractéristiques des systèmes d'élevage, ces études de cas montrent aussi que la conception des innovations doit souvent être implémentée à différentes échelles afin de saisir les relations entre les composantes des systèmes d'élevage et celles de leur environnement. La mobilité des troupeaux implique par exemple de prendre en compte d'autres ressources et activités territoriales (multi-utilisation des espaces, multifonctionnalité du bétail) ou le renouvellement de la végétation spontanée (parcours). Les systèmes d'élevage impliquent également de concevoir des innovations sur le long terme, en fonction du temps de sélection de l'élevage, des cycles de reproduction.

5. Synthèse et conclusion. La place des élevages familiaux de ruminants au pâturage en zones méditerranéennes et tropicales pour un développement durable

Charles-Henri Moulin, Alexandre Ickowicz

Les travaux présentés dans les trois chapitres précédents ont montré que les élevages familiaux conduits au pâturage dans les zones méditerranéennes et tropicales remplissent de nombreuses fonctions, renvoyant aux différents objectifs de développement durable (ODD). Ils possèdent des atouts importants étant donné leurs capacités d'adaptation aux changements, d'innovation pour la transition agroécologique de l'agriculture et leurs performances en matière d'efficiences économique, environnementale et sociale. Nous mettrons en exergue dans ce chapitre conclusif les trois points suivants qui représentent des sujets critiques pour la contribution de ces élevages au développement durable.

- Les élevages familiaux de ruminants au pâturage (tel que défini dans le chapitre 1) présentent des formes diverses et dynamiques d'élevage qui peuvent contribuer de façon solide au développement durable, de manière complémentaire à d'autres formes d'activités d'élevage. Ces contributions originales relèvent de certaines caractéristiques ou propriétés de ces élevages au pâturage (adaptabilité, mobilité, usage important de ressources naturelles renouvelables et d'espaces, recours importants à de la main-d'œuvre et aux savoirs locaux).
- Cependant, les évolutions constatées, résultats de l'interaction entre les familles développant ce type d'élevage et leur environnement biophysique et socio-économique, ne vont pas toujours dans les directions données par les ODD et doivent donc être mieux accompagnées.
- Finalement, l'échelle des territoires dans lesquels se déploient ces activités d'élevage apparaît comme le niveau d'analyse et d'intervention le plus pertinent pour accompagner ces évolutions dans un sens favorable au développement durable.



Des élevages complexes, diversifiés et en dynamique à mieux appréhender

Les nombreuses études de cas présentées précédemment sont une bonne illustration de la diversité des élevages familiaux au pâturage, côtoyant éventuellement d'autres

formes d'élevage dans les territoires des zones méditerranéennes et tropicales. Sans être exhaustif et sans vouloir proposer une classification, cette diversité est à relier à la complexité de ces élevages au pâturage qui mobilisent de nombreuses ressources et organisent leurs interactions à différentes échelles spatio-temporelles, en ce qui concerne par exemple l'accès aux facteurs de production, que ce soit pour le bétail ou les ressources nécessaires à son élevage et sa mobilité, mettant en relation des ressources relevant d'espaces aux usages souvent partagés et les systèmes d'acteurs variés qui les gèrent (chapitres 2 et 3). Cette complexité et cette diversité des élevages au pâturage nécessitent d'être analysées et accompagnées à travers des approches interdisciplinaires afin de comprendre la richesse des interactions mises en œuvre et de respecter, dans la recherche de nouvelles trajectoires, les équilibres fragiles construits sur le temps long. Les trajectoires passées observées rendent bien compte de cette nécessité et démontrent qu'elle est un atout fort pour renforcer les capacités d'adaptation aux changements.

Si ces élevages au pâturage sont très complexes et divers, ils sont également en évolution. Les travaux présentés, soit sur les processus d'adaptation considérés sur plusieurs décades (chapitre 2), soit sur l'accompagnement de processus d'innovations en cours (chapitre 4), ont bien montré des évolutions marquantes, plus ou moins profondes selon les contextes. Les dynamiques peuvent être très fortes et rapides, comme le montrent les situations au Vietnam ou en Amazonie brésilienne ; elles peuvent être plus lentes, plus contrastées entre espaces d'une même zone géographique (Afrique de l'Ouest, pourtour méditerranéen, océan Indien). Mais les changements globaux à l'œuvre, comme l'augmentation de la densité de population dans des terroirs d'Afrique de l'Ouest, accélèrent les évolutions des systèmes agricoles. Finalement, ces élevages au pâturage sont loin d'une certaine image d'immobilisme qui leur est parfois accolée, en lien notamment avec la faiblesse des moyens dont disposent des familles souvent pauvres pour investir dans leurs activités d'élevage.

La diversité des situations, selon les territoires étudiés, en matière de types d'élevage présent et de contextes biophysiques et socio-économiques, ainsi que la diversité des dynamiques observées ou accompagnées invitent à considérer la contribution des élevages au pâturage de façon nuancée : il ne s'agit pas de procéder à des généralisations hâtives à partir d'une situation donnée. Il ne s'agit pas non plus de généraliser une dynamique observée en un lieu et à un moment historique donné à d'autres situations. Mais les travaux présentés dans cet ouvrage, qui couvrent en grande partie cette diversité de situations à travers des études souvent diachroniques, permettent de dresser certaines conclusions quant aux contributions des élevages au pâturage aux ODD présentés dans le chapitre 1.

Des contributions aux objectifs de développement durable à accompagner

Au regard de l'ensemble des 8 ODD qui concernent directement l'élevage (chapitre 1), les travaux menés ont été focalisés essentiellement sur 5 ODD que nous pouvons regrouper en trois groupes :



• la promotion d'élevages pour assurer durablement la sécurité alimentaire (ODD2),
• la participation des élevages à une croissance économique soutenue et partagée (ODD8) et à l'élimination de la pauvreté (ODD1),
• enfin l'adaptation des élevages aux changements climatiques (ODD13) et la préservation des écosystèmes terrestres (ODD15).

Des élevages familiaux au pâturage pour contribuer durablement à la sécurité alimentaire

Les élevages au pâturage peuvent concourir de façon durable et significative à la fourniture de denrées d'origine animale. Cette contribution à la durabilité des systèmes alimentaires est à relier à la capacité de ces élevages à utiliser des ressources locales (qu'elles soient végétales ou animales), en assurant des transferts de biomasse et leur recyclage, au travers d'un ensemble de pratiques organisant la mobilisation de ces ressources (chapitre 2). Ceci permet à ces élevages peu artificialisés (peu de bâtiments et d'équipements) de consommer également peu d'intrants et leur confère des niveaux d'efficiences intéressants (chapitre 3). Ce type d'élevage peut donc être mis en œuvre avec relativement peu de moyens (éventuellement le seul bétail comme dans le cas des éleveurs sans terre en Inde) et participe à la sécurité alimentaire de ces familles pauvres. Les recherches permettant de mieux valoriser les biomasses (aliments, déjections) grâce à des innovations techniques et organisationnelles qui améliorent le recyclage dans les systèmes agriculture-élevage, à l'échelle des fermes et des territoires (chapitre 4) sont illustratifs de cette propriété des élevages au pâturage à contribuer aux systèmes alimentaires durables, mais également des marges de manœuvre qui existent pour renforcer encore leur efficience.

Cependant, les enjeux de la sécurité alimentaire posent la question de la capacité de ces élevages à nourrir les familles d'éleveurs, mais aussi à fournir des denrées d'origine animale aux autres fractions de la population, notamment les populations urbaines en croissance importante partout dans le monde. Si des élevages familiaux au pâturage peuvent être très efficients en ce qui concerne l'utilisation de l'azote, ils peuvent aussi être peu productifs (voir chapitre 3, exemple de la comparaison d'élevages caribéens et amazoniens), calculés à la tête de bétail ou à l'hectare. Dans des situations où la densité de population continue d'augmenter et où la dynamique d'occupation des sols est dominée par les terres cultivées d'une part et des surfaces de végétations protégées (forêts par exemple) d'autre part, d'où sont exclus les animaux d'élevage, les leviers du transfert et du recyclage des biomasses locales peuvent ne plus être suffisants pour soutenir effectivement un niveau de production compatible avec les enjeux de la sécurité alimentaire et de la transition agroécologique. Des apports extérieurs, notamment d'engrais, peuvent alors s'avérer nécessaires (voir chapitre 3). La complémentarité entre différents types de systèmes d'élevage, s'ils peuvent co-exister, peut aussi être une voie pour assurer la sécurité alimentaire, tant des familles d'éleveurs que du reste de la population.

Ces élevages peuvent cependant être intéressants par leurs efficiences, par exemple en valorisant des terres marginales, en transformant des biomasses de faibles valeurs en protéines

de qualité. Leurs efficiences leur confèrent en partie un caractère durable, en matière de consommation parcimonieuse de ressources. En revanche, étant peu artificialisés, ils sont fortement exposés aux chocs climatiques. Mis en œuvre par des familles ayant peu de moyens, dans des contextes où les systèmes de protection sont peu développés au-delà des solidarités familiales, ils sont également fortement exposés aux chocs économiques et aux aléas de la vie (maladie ou décès d'un actif familial). Renforcer la résilience de ces élevages est donc un impératif et les leviers en matière de capacités d'adaptation sont multiples, comme l'a montré le chapitre 2. Leur mise en œuvre de façon intégrée, aux différents niveaux d'organisation, est un enjeu important. Mais la capacité des élevages au pâturage à faire face seuls à tous les chocs est un leurre. Travailler sur les conditions socio-économiques et politiques qui pourvoient et assurent un système de protection auquel les éleveurs ont droit et doivent pouvoir avoir accès est aussi un enjeu majeur.

Des élevages familiaux au pâturage participant à une croissance économique soutenue et partagée et à l'élimination de la pauvreté

Les élevages familiaux au pâturage participent dans certains contextes de façon conséquente au PIB agricole et plus globalement au PIB d'un pays, comme le montre l'étude sur les chaînes de valeur de viande bovine internationalisées en Afrique australe. À cette échelle nationale, cet exemple a aussi mis en exergue les fragilités d'un secteur exportant sur un marché exigeant et important aussi massivement des produits de qualité inférieure (chapitre 3), avec une balance commerciale finalement négative. Toutefois, il a été montré que les élevages familiaux au pâturage concourent de façon significative à l'efficience économique des systèmes d'activités et contribuent ainsi à la viabilité économique de ces systèmes notamment dans les zones ou régions où peu d'alternatives existent (chapitre 3, étude en Égypte par exemple).

Cette efficience économique repose sur des efficiences techniques, en lien avec les valorisations et les transferts et recyclages de biomasse, comme cela a déjà mentionné dans la section précédente. Cependant, la mise en œuvre de pratiques favorisant le recyclage et l'usage raisonné des ressources locales (notamment sur les terres de parcours) nécessitent beaucoup de main-d'œuvre. Leur mise en œuvre peut ainsi être limitée dans les situations où le facteur travail devient limitant par rapport à d'autres facteurs de production. La recherche d'une productivité élevée du travail est alors un moteur très puissant de l'évolution de ces systèmes. C'est le cas par exemple dans le contexte des zones méditerranéennes françaises. Les inventions et innovations techniques permettant de diminuer les temps de travaux nécessaires pour la mise en œuvre de pratiques plus agroécologiques, en automatisant certaines tâches ou en facilitant la prise de décision (voir chapitre 4), sont une voie prometteuse dans ces situations pour favoriser des pratiques d'intérêt, par exemple d'un point de vue des impacts environnementaux de l'élevage. Mais elles sont coûteuses en travail.

Si l'élevage au pâturage contribue souvent de façon importante au revenu des familles, certaines évolutions observées ont montré que les processus de changement ne vont pas toujours dans le sens d'un développement équitable entre les familles (voir chapitre 2).



L'exclusion d'une partie des familles dans des processus de développement est classiquement observée dans de nombreux secteurs économiques. La sortie de l'élevage pastoral d'une partie des familles ou de certains membres de la famille a également été montrée. L'élevage ne permet pas notamment d'absorber la croissance démographique étant donné la faible densité de population permise par cet élevage extensif et peu productif à la tête de bétail, seule activité agricole possible par ailleurs en zones arides en l'absence d'aménagements hydrauliques. Tant que d'autres secteurs d'activités économiques, éventuellement dans d'autres régions, peuvent offrir des emplois ou des revenus pour ces sortants, cela ne représente pas un problème de développement durable. En revanche, ces exclusions deviennent un problème grave quand ces opportunités n'existent pas ou que les familles d'éleveurs paupérisés n'y ont pas accès. L'analyse des conséquences des processus d'innovation, en ce qui concerne l'inclusion des familles d'éleveurs, que ce soient des innovations techniques ou organisationnelles, notamment au sein des filières d'élevage, est un impératif dans bon nombre de situations où les familles d'éleveurs sont déjà marginalisées, dans un contexte socio-économique peu porteur.

Des élevages familiaux au pâturage contribuant à l'atténuation du changement climatique et à la préservation des écosystèmes terrestres dans un équilibre fragile

Les relations entre élevage et changement climatique sont à envisager à la fois en matière d'adaptation et d'atténuation. Les élevages familiaux au pâturage en zones méditerranéennes et tropicales sont fortement soumis au changement climatique, avec une exacerbation des phénomènes extrêmes, comme la succession de plusieurs années de sécheresse, et des tendances de long terme comme la diminution de la production de biomasse primaire suite à l'élévation des températures ou à l'augmentation du stress thermique chez les animaux amenés à se déplacer sur de longues distances pour constituer leur ration sur des espaces à végétation éparse. De nombreux leviers d'adaptation présentés dans le chapitre 2 renvoient à la nécessité de renforcer la robustesse de ces élevages face au changement climatique.

Les élevages familiaux au pâturage contribuent aussi à ces changements climatiques, du fait des émissions de GES et notamment de méthane entérique produit par les ruminants. Préciser les facteurs d'émission des animaux en zone tropicale reste un objectif important pour affiner le bilan carbone à l'échelle des exploitations et des territoires. Les travaux présentés au chapitre 3 ont montré les potentiels d'atténuation des émissions, mais également que les bilans carbone peuvent être neutres voire négatifs (stockage net de carbone) à l'échelle des exploitations, mais encore plus à l'échelle des territoires, en fonction des équilibres des occupations des sols et des capacités de séquestration du carbone par les prairies et par les différents types de parcours, plus ou moins boisés. L'efficience énergétique des élevages au pâturage est également démontrée, avec une moindre consommation d'énergie non renouvelable. Cela place l'élevage au pâturage comme un système crédible non seulement face à l'urgence climatique, mais aussi pour que l'élevage puisse

remplir ses fonctions d'assurer les revenus et la sécurité alimentaire des familles d'éleveurs, tout en participant à un fonctionnement territorial au moins neutre sur le bilan carbone.

Mais, si les élevages au pâturage peuvent fournir des denrées alimentaires diversifiées (produits végétaux et animaux) et d'autres services, tout en présentant un bilan carbone neutre, l'équilibre est instable et toute modification de conduite et d'occupation de sols peut remettre en question la neutralité du bilan. L'évaluation *ex ante* et la modélisation des impacts des innovations (voir chapitre 4) à la fois en ce qui concerne l'adaptation des élevages et la capacité d'atténuation constituent donc un défi important.

En matière de préservation des écosystèmes terrestres, l'élevage pastoral, utilisateur de vastes surfaces de végétations spontanées, contribue, s'il est bien mené, au maintien de milieux ouverts et aux services écosystémiques associés (habitats et biodiversité, maintien de mosaïques paysagères, cycle de l'eau et des nutriments, prévention des feux de forêt…). C'est un enjeu important dans des territoires à vocation pastorale, mais où les extensions de l'agriculture ont entraîné déprise et baisse de l'usage des surfaces de végétation spontanée (cas des zones méditerranéennes françaises). Dans d'autres contextes se pose la question de l'intensification de l'utilisation de certains espaces, soit causant la disparition des anciennes terres de parcours, soit pour assurer la préservation ou la restauration d'écosystèmes terrestres (notamment forestiers). L'exemple du développement d'une nouvelle trame forestière dans une zone de l'Amazonie brésilienne est un bon exemple d'évolution favorable sur le plan environnemental suite à l'intensification de l'utilisation des prairies sur les sols les plus favorables. En revanche, le repli sur les surfaces cultivées mécanisables pour produire des fourrages, à pâturer ou à conserver, dans les zones méditerranéennes françaises est une évolution défavorable, entraînant l'abandon des surfaces de parcours sur lesquelles l'élevage est attendu pour ces fonctions de maintien de milieux ouverts. Ainsi, selon les contextes et les modalités de l'intensification des prairies, un processus de même nature peut donc être plus ou moins favorable aux enjeux de développement durable de chacun des territoires.

Par leurs efficiences, les élevages au pâturage, en raison de leur capacité de valoriser un ensemble de ressources naturelles (végétations spontanées des prairies et des parcours) et de ressources non valorisables en alimentation humaine (résidus de cultures, coproduits agro-industriels), peuvent donc contribuer à la préservation des écosystèmes terrestres. Cependant, les évolutions observées ne vont pas toujours dans ce sens, en lien avec les contextes politiques et socio-économiques. C'est ce que montre l'étude sur l'intégration agriculture-élevage dans le Gujarat en Inde. L'intégration est ici limitée par l'accès facile des agriculteurs aux engrais azotés et par une structure socio-foncière inégalitaire (voir chapitre 3), ce qui démontre ainsi la nécessité de politiques résolument tournées vers la transition agroécologique de l'agriculture.



Pour une prise en compte dans les territoires de la multifonctionnalité des élevages au pâturage sur le temps long

La formulation de 17 ODD distincts permet de pointer des priorités sur lesquelles les États membres de l'ONU se sont entendus en matière de développement durable. Mais c'est bien en avançant sur ces différents ODD de façon équilibrée que le concept de développement durable prend tout son sens. De la même façon, dans cet équilibre précaire décrit précédemment, considérer la contribution de l'élevage au pâturage au développement durable nécessite de prendre en compte simultanément les différents ODD concernés. Ceci est d'autant plus vrai pour l'élevage familial au pâturage qui, du fait de ses caractéristiques (diversité de biens et services produits, capacité à valoriser des ressources locales dans leur territoire, valorisation de vastes espaces avec mobilisation de ressources humaines importantes), est fortement multifonctionnel et participe donc bien à une pluralité d'ODD, à la différence de forme d'élevages spécialisés sur un produit et déconnectés de l'usage de ressources locales.

L'élevage au pâturage, au-delà de sa multifonctionnalité, présente également d'autres caractéristiques importantes à prendre en compte quand il s'agit de penser le renforcement de ses contributions au développement durable. Comme tout système, les élevages au pâturage qui s'organisent essentiellement à l'échelle des familles, mais aussi collectivement au sein de territoires, doivent être pensés dans un emboîtement de niveaux d'organisation, depuis des niveaux infra, comme les fonctions physiologiques des animaux, à des niveaux correspondant aux entités gérées par la famille (le troupeau, l'ensemble des cheptels de la famille, les parcs de pâturage, les circuits de garde) et jusqu'à des niveaux englobants (la population des animaux au sein de laquelle se font des échanges reproductifs, le système agraire où s'articulent différents systèmes de production agricole mettant en valeur et renouvelant les ressources du milieu). Ces niveaux englobants sont très importants à prendre en compte : une approche centrée sur l'exploitation d'élevage, même pensée dans son environnement (accès au marché par exemple), ne peut être suffisante. En effet, ces élevages au pâturage, par leur empreinte spatiale, sont le plus souvent partie prenante d'un multi-usage des espaces, rendu possible notamment par la mobilité des animaux et les arrangements divers permettant à des ayants droit de pratiquer différents usages sur le même espace. Au-delà des niveaux d'organisation pertinents pour penser l'élevage au pâturage, la prise en compte de différentes échelles temporelles est également indispensable. En effet, ces élevages intègrent des processus pluriannuels, comme les dynamiques des végétations spontanées, en partie déterminées par les modalités du pâturage, ou comme les évolutions des populations animales mises en jeu au gré des successions de générations et soumises tant à une pression de sélection naturelle qu'à une pression de pratiques de sélection des éleveurs et de leurs organisations.

Comme pour tous les systèmes agricoles, travailler sur la contribution des élevages familiaux au pâturage au développement durable nécessite une approche systémique, articulant des analyses à différentes échelles spatio-temporelles et des analyses pluridisciplinaires, permettant de croiser les points de vue d'un ensemble de disciplines pertinentes

pour traiter les différentes dimensions des ODD. Cette approche est également nécessaire pour penser la conception d'inventions et d'innovations pertinentes, notamment de façon participative comme présentée dans certaines des études de cas du chapitre 4. Pour renforcer la résilience des élevages au pâturage et des territoires dans lesquels ils se déploient, les leviers d'adaptation et d'accroissement de l'efficience sont multiples. Au-delà de la production de connaissances sur chacun des leviers, l'enjeu est de les penser en combinaison, aux différents niveaux d'organisation et dans différentes temporalités. Les travaux sur les efficiences ont bien montré l'intérêt du concept, du fait de sa plasticité (multiples dimensions prises en compte) et sa capacité à rendre compte d'une approche systémique des processus à l'œuvre dans la construction de ces efficiences.

Les études décrites dans cet ouvrage ont également montré que la contribution des élevages au pâturage ne peut pas se réfléchir dans l'absolu, mais bien au regard d'un contexte, de la situation d'un territoire dans lequel se déploient les activités d'élevage, en synergie ou compétition avec d'autres activités, qu'elles soient agricoles ou autres. Ceci renvoie par exemple aux liens entre ces systèmes d'élevage et les autres systèmes agricoles (y compris d'autres formes d'élevage). Ces échanges peuvent prendre différentes formes, qu'il s'agisse de biomasses, pour raisonner l'intégration culture-élevage à une échelle territoriale ou encore de travail ou de coopération autour de ressources partagées (foncier, produits alimentaires…). Ce sont aussi des relations avec les autres activités économiques dans le territoire dans le cadre d'une économie circulaire. Dans ces situations, les bouquets de fonctions ou de services attendus et réalisables par les élevages au pâturage sont différents d'un territoire à l'autre, selon les caractéristiques des espaces et des activités mises en relation et du système d'acteurs qui gèrent les activités dans le territoire. Ceci renforce le besoin de raisonner les contributions des élevages au pâturage au regard des enjeux des territoires, notamment comment se déclinent localement dans les choix politiques les enjeux nationaux et globaux (comme le changement climatique).

Cependant, pour que les élevages au pâturage puissent remplir les fonctions qu'ils peuvent potentiellement assurer et contribuer au développement des territoires, la reconnaissance de leur multifonctionnalité par le système d'acteurs impliqués dans la gestion du territoire est un préalable indispensable. Les outils de modélisation participative autour de la multifonctionnalité peuvent contribuer à cette reconnaissance (encadré 3.7). Faire reconnaître la multifonctionnalité des élevages au pâturage auprès des acteurs d'un territoire est une première étape. Le travail sur des outils, comme la finance verte ou la déclinaison de critères d'évaluation en matière d'efficience, pour éclairer les décisions collectives, est une autre voie à poursuivre.



Conclusion générale

Nous avons montré comment les élevages familiaux de ruminants au pâturage peuvent contribuer directement à trois groupes d'ODD : éliminer la pauvreté, assurer la



sécurité alimentaire et promouvoir une agriculture durable ; promouvoir une croissance économique soutenue et partagée ; lutter contre le changement climatique et ses répercussions, préserver et restaurer les écosystèmes terrestres.

Certains ODD n'ont pas été abordés dans cet ouvrage, bien que l'élevage soit concerné, en particulier les élevages familiaux au pâturage. C'est le cas de l'ODD sur l'égalité des sexes et l'autonomisation des femmes, pour lequel l'élevage familial peut être un levier pertinent, mais avec des risques de prise de contrôle de l'activité par les hommes, lorsque celle-ci prend de l'ampleur et quand l'enjeu économique augmente. C'est également le cas de l'ODD sur la santé et le bien-être de tous, avec des enjeux forts de santé animale et de santé publique, notamment autour des questions de biosécurisation des élevages quand les animaux sortent en plein air (contacts entre faune sauvage et animaux d'élevage ou contrôle des mobilités animales pour limiter la diffusion d'épizootie). Ce sont autant d'éléments qui peuvent fragiliser les élevages au pâturage. Cet ODD santé et bien-être renvoie aussi à la question du bien-être animal, qui devient un enjeu fort de controverses et de moteurs des évolutions des conduites en élevage. L'élevage familial au pâturage a de ce point de vue des atouts majeurs à mettre en avant grâce à des conduites d'élevage en plein air. Les travaux futurs devront prendre en compte ces autres dimensions du développement durable, notamment dans un contexte où les systèmes alimentaires durables s'installent au cœur des stratégies de politiques agricoles internationales. Ces travaux devront être toujours pensés dans un cadre pluridisciplinaire, en recherchant des alliances entre les différentes compétences de recherche en élevage à l'échelle française ou internationale.

Les élevages au pâturage évoluent sous l'effet d'un ensemble de facteurs interdépendants qui pour certains sont hors du secteur de l'élevage, mais s'appliquent aux mêmes ressources et espaces. Leur contribution au développement durable n'est donc jamais définitivement acquise. Si certaines de leurs caractéristiques leur confèrent des atouts indéniables pour jouer un rôle majeur, de multiples exemples tirés des études de cas présentées dans cet ouvrage ont bien montré que les évolutions liées à des moteurs économiques puissants et aux politiques publiques sectorielles (tant agricoles, que douanières ou environnementales) peuvent conduire à des évolutions défavorables en matière de développement durable. Il s'agit donc de continuer à renseigner et à communiquer sur ces évolutions au plus près de ce qui se passe dans les territoires et de continuer à produire des connaissances et des outils pour accompagner les processus en cours, qu'ils soient pensés en termes d'adaptation, d'efficience, d'innovation. Ces évolutions sont complexes et certaines de leurs dimensions n'ont pas été suffisamment travaillées dans les travaux présentés dans cet ouvrage, autour du genre en particulier ou de la prise en compte de l'avenir des jeunes. Dans les transitions auxquelles les systèmes alimentaires mondiaux doivent s'engager pour faire face aux défis actuels, les élevages familiaux de ruminants au pâturage offrent de nombreux leviers et ont des atouts forts. L'expression de ces atouts dépend cependant de la mobilisation de l'ensemble des acteurs de l'élevage – femmes,

hommes, jeunes –, mais aussi de l'évolution du contexte dans lequel ces acteurs agissent, avec des politiques adaptées ou le développement de filières inclusives.

Il s'agit d'éclairer les acteurs sur les transformations des élevages, les éleveurs et leurs organisations au premier chef, mais également les différentes institutions qui œuvrent au développement des activités d'élevage. Il convient notamment de poursuivre les travaux sur les compromis entre dimensions du développement durable (sociale, économique, environnementale, de gouvernance) et entre ces dimensions et la résilience des élevages et des territoires, afin d'éclairer les acteurs sur les compromis à gérer et opérationnaliser pour le futur.

Il s'agit également de mettre à disposition des acteurs politiques des connaissances pour éclairer les décisions publiques, à différents niveaux de gouvernance (de la commune à des ensembles sous-régionaux), favorisant des ruptures et la définition de nouvelles trajectoires agricoles. En effet, la continuelle adaptation des élevages familiaux de ruminants au pâturage ne permettra pas de répondre, seule, à l'urgence des défis actuels en matière d'élimination de la faim et de la pauvreté, tout en préservant les ressources de la planète. Ces élevages ont une place à prendre, par exemple dans des systèmes alimentaires localisés, jouant sur des aliments d'origine animale typés, mais sûrement en complément d'autres systèmes de production agricole, mobilisant d'autres façons de produire, d'autres espèces animales que les ruminants, d'autres formes d'organisation du travail et du capital. La condition est alors que des politiques publiques éclairées permettent une coexistence équitable de ces différents modèles agricoles pour un système alimentaire global diversifié et durable.

Bibliographie

Abbab A., Neffati M., Sghaier M., Khorchami T., Nefzaoui A., Frija A., Jalouali S., Ghoudi Z.E., 2020. Synthèse des principaux acquis de l'expérience tunisienne en matière du développement des territoires pastoraux. *Revue des régions arides*, 47, 19 p.

Aïdoud A., Le Floc'h E., Le Houérou H.N., 2006. Les steppes arides du nord de l'Afrique. *Sécheresse*, 17(1-2):19-30.

Alary V., Messad S., Aboul-Naga A., Osman M.A., Abdelsabour T.H., Salah A.A.E., Juanes X, 2020. Multicriteria assessment of the sustainability of crop-livestock farming systems in the reclaimed desert lands of Egypt. *Agricultural Systems*, 183:102863,14 p. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102863

Alary V., Aboul-Naga A., Osman M.A., Daoud I., Abdelraheem S., Salah E., Juanès X., BonnetP., 2018. Desert land reclamation programs and family land dynamics in the Western Desert of the Nile Delta (Egypt), *World Development*, 1960–2010, 104:140-153. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2017.11.017.

Alary V., Messad S., Daoud I., Aboul-Naga A., Osman M.A., Bonnet P., Tourrand J.F., 2016. Social Network and Vulnerability: A Clear Link in Bedouin Society (Egypt). *Human Ecology*, 44(1):81-90. https://doi.org/10.1007/s10745-016-9807-z.

Alary V., Aboul-Naga A., El Shafie M., Abdelkrim N., Hamdon H., Metawi H., 2015. Roles of small ruminants in rural livelihood improvement Comparative analysis in Egypt. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 68 (2-3):79-85.

Alary V., Hassan F., Daoud I., Aboul Naga A., Osman M.A., Bastianelli D., Lescoat P., Moselhy N., Tourrand J.F., 2014. Bedouin Adaptation to the Last 15-Years of Drought (1995–2010) in the North Coastal Zone of Egypt: Continuity or Rupture? *World development*, 62:125–137.

Alary V., Duteurtre G., Faye B., 2011. Élevages et sociétés : les rôles multiples de l'élevage dans les pays tropicaux. *Inra Productions Animales*, 24(1):145-156.

Alhamada M., Debus N., Bocquier F., 2017a. An automated method for the evaluation of ram libido in real mating conditions. *Animal*, 11:2036-2044.

Alhamada M., Debus N., González-García E., Bocquier F., 2017b. Sexual behaviour in sheep is driven by body condition and the related nutritional and metabolic status. *Applied Animal Behaviour Science*, 191:24-30.

Alhamada M., Debus N., Lurette A., Bocquier F., 2017c. Automatic oestrus detection system enables monitoring of sexual behaviour in sheep. *Small Ruminant Research,* 149:105-111.

Alhamada M., Debus N., Lurette A., Viudes G., Bocquier F., 2016. *Small Ruminant Research*, 134:97-104.

Alvarez S., Rufino M.C., Vayssières J., Salgado P., Tittonell P., Tillard E., Bocquier F., 2014. Whole-farm nitrogen cycling and intensification of crop-livestock systems in the highlands of Madagascar: An application of network analysis. *Agricultural Systems*, 126:25–37. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2013.03.005

Anandajayasekeram P., 2011. The role of agricultural R&D within the agricultural innovation systems framework, *in* Conference Working Paper 6. Asti/Ifpri-Fara Conference, Accra, Ghana, December 5-7, 40 p.

Ancey V., Avelange I., Dedieu B., 2013. *Agir en situation d'incertitude en agriculture : Regards pluridisciplinaires au Nord et au Sud.* Bruxelles, PIE-Peter Lang, 422 p. (Ecopolis, 17).

Archimède H., Rira M., Eugène M., Fleury J., Lastel M.L., Periacarpin F., Silou-Étienne T., Morgavi D.P., Doreau M., 2018. Intake, total-tract digestibility and methane emissions of Texel and Blackbelly sheep fed C4 and C3 grasses tested simultaneously in a temperate and a tropical area, *Journal of Cleaner Production*, 185:455–463. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.059

Assouma M.H., Hiernaux P., Lecomte P., Ickowicz A., Bernoux M., Vayssières J., 2019. Contrasted seasonal balances in a Sahelian pastoral ecosystem result in a neutral annual carbon balance. *Journal of Arid Environments*, 162:62-73. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.11.013

Assouma M.H., Lecomte P., Hiernaux P., Ickowicz A., Corniaux C., Decruyenaere V., Diarra A.R., Vayssières J., 2018. How to better account for livestock diversity and fodder seasonality in assessing the fodder intake of livestock grazing semi-arid sub-Saharan Africa rangelands. *Livestock Science*, 216:16-23. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2018.07.002

Assouma M.H., 2016. *Approche écosystémique du bilan des gaz à effet de serre d'un territoire sylvo-pastoral sahélien : contribution de l'élevage*, thèse de doctorat, Paris, Montpellier, AgroParisTech, 230 p. http://agritrop.cirad.fr/593394/

Aubron C., Vigne M., Philippon O., Lucas C., Lesens P., Upton S., Salgado P., Ruiz L., 2021. Nitrogen metabolism of an Indian village based on the comparative agriculture approach: How characterizing social diversity was essential for understanding crop-livestock integration. *Agricultural Systems*, 193 :103218. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103218

Aubron C., Latrille M., Lhoste V., 2019. Dynamiques agraires dans les Causses et Cévennes. Limites d'un développement centré sur l'accroissement de la productivité physique du travail et émergence d'alternatives, *in* Aubron C., Garambois N., Nozières-Petit M.O., *L'économie agropastorale revisitée*, Association française de pastoralisme, Cardère éditeur, p. 19-42.

Aubron C., Noël L., Lasseur J., 2016. Labor as a driver of changes in herd feeding patterns: Evidence from a diachronic approach in Mediterranean France and lessons for agroecology. *Ecological Economics*, 127, p. 68-79.

Audouin E., Vayssières J., Odru M., Masse D., Dorégo G.S., Delaunay V., Lecomte P., 2015. Réintroduire l'élevage pour accroître la durabilité des terroirs villageois d'Afrique de l'Ouest: le cas du bassin arachidier au Sénégal, *in* Sultan B., Lalou R., Oumarou A., Sanni M.A., Soumare A. (ed.). *Les sociétés rurales face aux changements environnementaux en Afrique de l'Ouest*, IRD, Marseille, France, p. 403-427.

Azambuja Filho J.C.R., de Faccio Carvalho P.C., Bonnet O.J.F., Bastianelli D., Jouven M., 2020. Functional classification of feed items in Pampa grassland, based on their near-infrared spectrum, *Rangeland Ecology & Management*, 73(3):358-367. https://doi.org/10.1016/j.rama.2020.02.001

Banque mondiale, 2006. *Enhancing Agricultural Innovations: How to Go Beyond Strengthening Research Systems*, Washington, Banque mondiale.

Bastianelli D., Bonnal L., Barre P., Nabeneza S., Salgado P., Andueza D., 2018. La spectrométrie dans le proche infrarouge pour la caractérisation des ressources alimentaires, *Inra Productions animales*, 31(3):237-254. https://doi.org/10.20870/productions-animales.2018.31.2.2330

Baumont R., Aufrère J., Niderkorn V., Andueza D., Surault F., Peccatte J.R., Delaby L., Pelletier P., 2008. La diversité spécifique dans le fourrage : conséquences sur la valeur alimentaire, *Fourrages*, 194:189-206.

Bénagabou O.I., Blanchard M., Yaméogo V.M.C.B., Vayssières J., Vigne M., Vall É., Lecomte P., Nacro H.B., 2017. L'intégration agriculture-élevage améliore-t-elle l'efficience, le recyclage et l'autonomie énergétique brute des exploitations familiales mixtes au Burkina Faso ? *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux,* 70:31-41. https://doi.org/10.19182/remvt.31479

Bencherif S., 2018. Origines et transformations récentes de l'élevage pastoral de la steppe algérienne. *Revue internationale des études du développement*, 236:55-79.

Berre D., Boussemart J.P., Blancard S., Leleu H., Tillard E., 2014. Finding the right compromise between productivity and environmental efficiency on high input tropical dairy farms: a case study. *Journal of Environmental Management*, 146:235-244.

Bessaoud O., 2013. La question foncière au Maghreb : la longue marche vers la privatisation. *Les Cahiers du CREAD*, 103:17-44.

Blanc F., Bocquier F., Debus N., Agabriel J., D'hour P., Chillard Y., 2004. La pérennité et la durabilité des élevages de ruminants dépendent des capacités adaptatives des femelles, *INRA Productions animales*, 17:287-302.



Blanchard M., Vall É., Tingueri B., Meynard J.M., 2017. Identification, caractérisation et évaluation des pratiques atypiques de gestion des fumures organiques au Burkina Faso : sources d'innovation ?, *Autrepart*, 81:115-134.

Blanchard M., Vayssières J., Dugue P., Éric V., 2013. Local Technical Knowledge and Efficiency of Organic Fertilizer Production in South Mali: Diversity of Practices. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 37:672–699. https://doi.org/10.1080/21683565.2013.775687

Blanchard M., 2010. *Gestion de la fertilité des sols et rôle du troupeau dans les systèmes coton-céréales-élevage au Mali-Sud : savoirs techniques locaux et pratiques d'intégration agriculture élevage*, Thèse de doctorat, École doctorale Sciences, Ingénierie et Environnement, Paris Est, 298 p.

Blanfort V., Stahl C., Klumpp K., Falcimagne R., Darsonville O., Fontaine S., Picon-Cochard C., Boval M., Ouliac B., Hérault B., Lecomte P., 2015a. Les systèmes herbagers issus de déforestation en Amazonie française (Guyane) : vers la réalisation de bilans de carbone, *in* Broc J.S., Bourges B. (ed.), Gourdon T. (ed.), *Empreinte carbone : évaluer et agir : aperçu pluridisciplinaire des recherches francophones*. Paris, Presses des Mines, p. 55-70 (Développement durable).

Blanfort V., Vigne M., Vayssieres J., Lecomte P., Lasseur J., Ickowicz A., 2015b. Les rôles agronomiques de l'élevage dans la contribution à l'adaptation et l'atténuation du changement climatique au Nord et au Sud, *Agronomie Environnement et Sociétés*, 5(1):107-115.

Blanfort V., Stahl C., 2013. *Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane. Processus. Bilans et perspectives*, Cayenne, Guyane française, Octobre 2013, Cirad, Montpellier, France.

Blanfort V., Doreau M., Huguenin J., Lazard J., Porphyre V., Soussana J.F., Toutain B., 2011. Impacts et services environnementaux de l'élevage en régions chaudes, *INRA Productions Animales*, 24 :89-112.

Blanfort V., Desmoulins F., Prosperi J., Le Bourgeois T., Guiglion R., Grard P., 2010. AdvenPaC V.1.0 Principales adventices et plantes à conflit d'intérêt des Pâturages de Nouvelle-Calédonie, IAC, Cirad, Montpellier, France. Cd-rom. ISBN 978-2-87614-670-9. http://idao.cirad.fr/applications

Bonaudo T., Bendahan A.B., Sabatier R., Ryschawy J., Bellon S., Leger F., Magda D., Tichit M., 2014. Agroecological principles for the redesign of integrated crop-livestock systems. *European Journal of Agronomy*, 57:43-51. https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.010

Bonnet O.J.F., Meuret M., Tischler M.R., Cezimbra I.M., Azambuja C.R., Carvalho P.C.F., 2015. Continuous bite monitoring: a method to assess the foraging dynamics of herbivores in natural grazing conditions, *Animal Production Science*, 55:339-349. http://dx.doi.org/10.1071/AN14540

Bordet A.C., Bochu J.L., Touchemoulin O., 2011. *Références PLANETE 2010. Fiche 10-Production « Bovin Viande »*, Toulouse, Solagro, 2010, 9 p.

Bosc P.M., Sourisseau J.M., 2019. Sustainable rural livelihoods to analyse family farming dynamics: A comparative perspective. *Natural Resource Economics Review*, 35-49. Workshop on Study of Family-run Farming, 2015, March 15th, Kyoto, Japon. https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/240911

Boivin N., Crowther A., Helm R., Fuller D.Q., 2013. East Africa and Madagascar in the Indian Ocean world, *Journal of World Prehistory*, 26(3):213-281.

Bouchareb B., Huguenin J., Hammouda R., Nedjraoui D., 2020. Suivi diachronique de steppe restaurée – Constats et perspectives. *Fourrages*, 241:71-78.

Burlamaqui B., 2015. *Systèmes intégrés agriculture-élevage-forêt (SILPF) dans l'État de Roraima, Amazonie brésilienne*. Thèse de doctorat en agronomie, Agroparistech, 2015, 415 p.

Campbell K.L.I (ed)., Hodgson N.H. (ed), Gill M. (ed.), 1999. *Boîte à outils « Élevage et environnement»*, Initiative pour l'Élevage, l'Environnement et le Développement, FAO, Rome. Cd-rom. ISBN 92-5-104445-7.

Caratini S., 2003. *La République des Sables. Anthropologie d'une Révolution* (vol. 1), L'Harmattan. https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01352425

Cesaro J.D., 2021. Aborder la multifonctionnalité de l'élevage laitier sahélien avec un outil de simulation: une approche multi-acteurs pour concevoir la résilience territoriale, GASL Webinar series, Action Network 2: Restoring value to Grasslands. https://www.youtube.com/watch?v=QotKaoLj-Og.

Chang J., Ciais P., Gasser T., Smith P., Herrero M., Havlík P., Obersteiner M., Guenet B., Goll D.S., Li W., Naipal V., Peng S., Qiu C., Tian H., Viovy N., Yue C., Zhu D., 2021. Climate warming from managed grasslands cancels the cooling effect of carbon sinks in sparsely grazed and natural grasslands, *Nature Communications*, 12:118. https://doi.org/10.1038/s41467-020-20406-7

Chia E., Marchesnay M., 2008. *Un regard des sciences de gestion sur la flexibilité : enjeux et perspectives*, Versailles, Éditions Quæ.

Chirat G., Groot J.C.J., Messad S., Bocquier F., Ickowicz A., 2014. Instantaneous intake rate of free-grazing cattle as affected by herbage characteristics in heterogeneous tropical agro-pastoral landscapes, *Applied Animal Behaviour Science*, 157: 48-60. http://dx.doi.org/10.1016/j.applanim.2014.06.003

Cirad, 2013. *Les agricultures familiales du monde. Définitions, contributions et politiques publiques*, Rapport d'expertise, Cirad, AFD, 306 p.

Compagnone C., Hubert B., Lasseur J., Le Guen R., Matthieu A., 2015. *Connaissances et systèmes de pensée des agriculteurs. L'actualité de l'approche de Jean Pierre Darré*, Sens des pratiques et dynamique des collectifs en agriculture. L'actualité des travaux de Jean-Pierre Darré, Septembre 2015, Dijon, France, 10 p.

Corniaux C., 2019. Les multinationales laitières en Afrique de l'Ouest : espoir ou désillusion pour les éleveurs ?, *in* Le Lait, vecteur de développement, Troisièmes Rencontres internationales, 12-13 juin 2019, Dakar, Sénégal. https://www6.inrae.fr/lait-vecteur-developpement/content/download/3599/34338/file/S53-Corniaux.pdf

Corniaux C., Duteurtre G., Broutin C., 2014. *Filières laitières et développement de l'élevage en Afrique de l'Ouest: l'essor des minilaiteries*, Paris, Karthala, 229 p.

Corriols J., 1965. Essai d'adaptation des plantes fourragères en Tunisie, *Annales de l'INRAT*, 38:39-44.

Dallaporta B., Bochu J.L., Vigne M., Ouliac B., Zoogones L., Lecomte P., Blanfort V., 2016. Taking into account carbon sequestration of pasture in carbon balance of cattle ranching systems established after deforestation in Amazonia, *in Proceedings of the 10th International Rangeland Congress*, 16 juillet 2016, Saskatoon, Canada, IRC, 399-401, IRC Saskatoon, Canada.

Daoudi A., Colin J.P., Baroud K., 2021. La politique de mise en valeur des terres arides en Algérie : une lecture en termes d'équité. *Cahiers Agricultures*, 30:4.

Darnhofer I., 2014. Resilience and why it matters for farm management. European *Review of Agricultural Economics*, 41:461-484.

Davies J., John Hall A., Maru Y., 2016. Understanding innovation platform effectiveness through experiences from west and central Africa, *Agricultural Systems*. http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2016.12.014

Debus N., Besche G., Lurette A., Guyonneau J.D., Tesniere A., Menassol J.B., Bocquier F, 2019. 70th EAAP Annual Meeting, 26-30 août 2019, Ghent, Belgique.

Debus N., Caraty A., Fabre-Nys C., Canepa S., Bocquier F., 2005. Restriction alimentaire, comportement sexuel et réponse endocrinienne de la brebis Mérinos d'Arles, in *1ère Journées d'animation scientifique du département Phase*, 15-16 mars, Tours, France.

Dendoncker M., Brandt M., Rasmussen K., Taugourdeau S., Fensholt R., Tucker C.J., Vincke C., 2020. 50 years of woody vegetation changes in the Ferlo (Senegal) assessed by high-resolution imagery and field surveys. *Regional environmental change*, 20:1-13.

De Vries M., De Boer I.J.M, 2021. Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments, *Livestock Science*, 128(1-3):1-11. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.11.007

Diouf M., Akpo L., Rocheteau A., Do F., Goudiaby V., Diagne A.L., 2002. Dynamique du peuplement ligneux d'une végétation sahélienne au Nord-Sénégal (Afrique de l'Ouest). *Journal des sciences*, 2:1-9.



Djiré M., Dicko A.K., 2007. *Les conventions locales face aux enjeux de la décentralisation au Mali*, Karthala, 224 p.

Doreau M., Benhissi H., Thior Y.E., Bois B., Leydet C., Genestoux L., Lecomte P., Morgavi D.P., Ickowicz A., 2016. Methanogenic potential of forages consumed throughout the year by cattle in a Sahelian pastoral area. *Animal Production Science*, 56:613. https://doi.org/10.1071/AN15487

Dumont B., Dupraz P., Donnars C., 2019. *Impacts et services issus des élevages européens*, Versailles, Éditions Quæ, 185 p.

Dumont B., Fortun-Lamothe L., Jouven M., Thomas M., Tichit M., 2013. Prospects from agroecology and industrial ecology for animal production in the 21st century, *Animal*, 7:1028-1043. https://doi.org/10.1017/S1751731112002418

Duteurtre G., Corniaux C., De Palmas A., 2020. *Lait, commerce et développement au Sahel : Impacts socio-économiques et environnementaux de l'importation des mélanges MGV européens en Afrique de l'Ouest*, Rapport pour les groupes Les Verts et S&D du parlement européen, Cirad, Montpellier, 74 p. https://agritrop.cirad.fr/597139/

Duteurtre G., Faye B., 2003. *L'élevage, richesse des pauvres. Stratégies d'éleveurs et organisations sociales face aux risques dans les pays du Sud*, Versailles, Éditions Quæ.

Dutilly C., Alary V., Bonnet P., Lesnoff M., Fandamu P., de Haan C., 2020. Multi-scale assessment of the livestock sector for policy design in Zambia, *Journal of Policy Modelling*, 42:401-418.

El Bilali H., Cardone G., Bottalico F., Ottomano G., Capone R., 2020. Pastoralism in the Maghreb: A review on environmental, socio-cultural, economic and politic aspects. *AGROFOR International Journal*, 5(3):105-118.

Fadiga M.L., 2013. Valuation of Cattle Attributes in the Malian Humid and Sub-Humid Zones and Implications for a Sustainable Management of Endemic Ruminant Livestock, *Environmental Economics*, 4(1):39-50.

FAO, 2018a. *Livestock and agroecology*, Rome, FAO, 16 p.

FAO, 2018b. *World livestock: Transforming the livestock sector through Sustainable Development Goals*, Rome, FAO, 222 p.

Ferreira L.A., 2001. *Le rôle de l´élevage bovin dans la viabilité agro-écologique et socio-économique des systèmes de production agricoles familiaux en Amazonie brésilienne – Le cas d´Uruará*, Thèse de Doctorat INA Paris-Grignon, Paris, 188 p.

Flori L., Moazami-Goudarzi K., Alary V., Araba A., Boujenane I., Boushaba N., Casabianca F., Casu S., Ciampolini R., Coeur D'Acier A., Coquelle C., Delgado J.V., El-Beltagi A., Hadjipavlou G., Jousselin E., Landi V., Lauvie A., Lecomte P., Ligda C., Marinthe C., Martinez A., Mastrangelo S., Menni D., Moulin C.H., Osman M.A., Pineau O., Portolano B., Rodellar C., Saïdi-Mehtar N., Sechi T., Sempéré G., Thévenon S., Tsiokos D., Laloë D., Gautier M., 2019. A genomic map of climate adaptation in Mediterranean cattle breeds, *Molecular Ecology*, 28(5):1009-1029.

Flori L., Thevenon S., Dayo G.K., Senou M., Sylla S., Berthier D., Moazami-Goudarzi K., Gautier M., 2014. Adaptive admixture in the West African bovine hybrid zone: insight from the Borgou population, *Molecular Ecology*, 23(13):3241-57.

Flori L., Gonzatti M.I., Thevenon S., Chantal I., Pinto J., Berthier D., Aso P.M., Gautier M., 2012. A quasi-exclusive European ancestry in the Senepol tropical cattle breed highlights the importance of the slick locus in tropical adaptation, *PLoS One*, 7(5):e36133.

Gaci D., Huguenin J., Kanoun M., Boutonnet J.P., Abdelkrim H., 2021. Nouvelles mobilités pastorales : cas des éleveurs d'ovins de la wilaya de Djelfa, Algérie, *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 74(1):3-11. http://dx.doi.org/10.19182/remvt.36324

Galeano E., 1971. *Las venas abiertas de América Latina*, Mexico, Siglo veintiuno editores, 365 p.



Garambois N., Aubron C., Morsel N., Latrille M., Jallot L., Lhoste V., 2020. The limits of coexistence: the development of "frugal" systems in agro-pastoral regions, *Review of Agricultural, Food and Environmental Studies*, 101:311-337.

Gasselin P., Lardon S., Cerdan C., Loudiyi S., Sautier D., 2020. The coexistence of agricultural and food models at the territorial scale: an analytical framework for a research agenda, *Review of Agricultural, Food and Environmental Studies*, 101:339-361.

Gaudio A., 1993. *Les populations du Sahara occidental : histoire, vie et culture*, Karthala.

Gautier M., 2015. Genome-Wide Scan for Adaptive Divergence and Association with Population-Specific Covariates, *Genetics*, 201(4):1555-79.

Gerber P.J., Steinfeld H., Henderson B., Mottet A., Opio C., Dijkman J., Falcucci A., Tempio G., 2013. *Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities*, Rome, FAO, 139 p.

Giec, 2019. Emissions from livestock and manure management, *in 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (Vol. 4), IPCC, Suisse.

Gintzbuger G., Bounejmate M., Nefzaoui A., 2000. *Folder shrub development in Arid and semi-arid zones*, Workshop on Native and Exotic Fodder Shrubs in Arid and Semi-arid Zones, 27 oct.-2 nov. 1996, Hammamét, Tunisie, Icarda/CGIAR, Vol I : 289 p., Vol II : 663 p., Icarda, Alep, Syrie.

Girard N., Goulet F., Jankowski F., Fiorelli C., Fortun-Lamothe L., Martin P., Prost L., Vertès F., 2017. Produire des connaissances pour et sur la transformation des systèmes agricoles. Retours sur une école-chercheurs interdisciplinaire. *Natures Sciences Sociétés*, 25(3):276-284.

González-García E., Alhamada M., Debus N., Menassol J.-B., Tesnière A., Gonçalves Vero J., Barboza B., Bocquier F., 2020a. Short-, medium- and long-term metabolic responses of adult ewes subjected to nutritional and β-adrenergic challenges, *Animals*, 10(8):1320. https://doi.org/10.3390/ani10081320

González-García E., Alhamada M., Nascimento H., Portes D., Bonnafe G., Allain C., Hassoun P., Gautier J.M., Parisot S., 2020b. Measuring liveweight changes in lactating dairy ewes by using an automated walk-over-weighing system, *Journal of Dairy Science*, 104(5):5675-5688. https://doi.org/10.3168/jds.2020-19075

González-García E., Alhamada M., Pradel J., Douls S., Parisot S., Bocquier F., Menasol J.B., Llach I., González L.A., 2018. A mobile and automated walk-over-weighing system for a close and remote monitoring of liveweight in sheep, *Computers and Electronics in Agriculture*, 153:226-238. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.022

González-García E., Hazard, D. 2016. Growth rates of Romane ewe lambs and correlated effects of being mated as hoggets or two-tooth ewes on first offspring performance, *Livestock Science*, 189, 63-69.

González-García E., Tesniere A., Camous S., Bocquier F., Barillet F., Hassoun P., 2015. The effects of parity, litter size, physiological state and milking frequency on the metabolic profile of Lacaune dairy ewes, *Domestic Animal Endocrinology*, 50:32-44.

González-García E., Gozzo de Figuereido V., Foulquie D., Jousserand E., Autran P., Camous S., Tesniere A., Bocquier F., Jouven M., 2014. Circannual body reserves dynamics and metabolic profile in Romane ewes grazing on rangelands, *Domestic Animal Endocrinology*, 46:37-48.

Goopy J., Korir D., Pelster D., Ali A., Wassie S., Schlecht E., Dickhoefer U., Merbold L., Butterbach-Bahl K., 2020. Severe below-maintenance feed intake increases methane yield from enteric fermentation in cattle, *British Journal of Nutrition*, 123(11):1239-1246. http://dx.doi.org/10.1017/S0007114519003350

Grillot M., Guerrin F., Gaudou B., Masse D., Vayssieres J., 2018a. Multi-level analysis of nutrient cycling within agro-sylvo-pastoral landscapes in West Africa using an agent-based model, *Environmental Modelling Software*, 107:267-280. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.05.003

Grillot M., Vayssières J., Masse D., 2018b. Agent-based modelling as a time machine to assess nutrient cycling reorganization during past agrarian transitions in West Africa, *Agricultural Systems*, 164:133-151.



Guellec D., 2009. *Économie de l'innovation*, Édition Repères, La Découverte.

Guerin H., Friot D., Mbaye Nd., Richard D., Dieng A. 1988. Régime alimentaire de ruminants domestiques (bovins, ovins, caprins) exploitant des parcours naturels sahéliens et soudano-sahéliens. II. Essai de description du régime par l'étude du comportement alimentaire. Facteurs de variation des choix alimentaires et conséquences nutritionnelles, *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 41(4):427-440.

Guesnerie R., Hautcoeur P.-C., 2003. *La recherche au service du développement durable*, Rapport du groupe de travail, Ministère délégué à la Recherche, Secrétariat d'État aux nouvelles technologies.

Guillou M., 2007. Conclusions, *in Recherche finalisée : améliorons nos pratiques*, 9 janvier 2007, Paris, Inra, p. 106.

Haberl H., Fischer-Kowalski M., Krausmann F., Martinez-Alier J., Winiwarter V., 2011. A socio-metabolic transition towards sustainability? Challenges for another Great Transformation, *Sustainable Development*, 19:1-14. https://doi.org/10.1002/sd.410

Hadbaoui I., Senoussi A., Huguenin J., 2020. Les modalités d'alimentation des troupeaux ovins en steppe algérienne, région de M'Sila : pratiques et tendances, *Cahiers Agricultures*, 29(28). https://doi.org/10.1051/cagri/2020027

Hammouda R.F., Huguenin J., Julien L., Nedjraoui D., 2019. Impact of agrarian practices and some pastoral uses on vegetation in Algerian steppe rangelands, *The Rangeland Journal,* 41(2):97-107.

Hanley N., Mourato S., Wright R.E., 2001. Choice Modelling Approaches: A Superior Alternative for Environmental V aluatioin?, *Journal of Economic Surveys*, 15:435-462. https://doi.org/10.1111/1467-6419.00145

Hassoun P., Allain C., Marnet P.G., González-García E., Larroque H., Vanbergue E., Dessauge F., Dzidic A., Autran P., Portes D., Guitard J.-P., Lagriffoul G., Tesnière A., Morin E., de Boissieu C., Moulin C.H., Lurette A., Barillet F., 2016. La monotraite quotidienne appliquée en brebis laitières de race Lacaune : Synthèse de cinq années de recherche, *INRA Productions animales*, 29(1):57-72.

Hervieu B., 2002. La multifonctionnalité : un cadre conceptuel pour une nouvelle organisation de la recherche sur les herbages et les systèmes d'élevage, *Fourrages*, 20:219-26.

Hirche A., Salamani M., Tarhouni M., Nedjraoui D., & al., 2018. The Maghreb (North Africa) rangelands evolution for forty years: regreening or degradation? Chapitre 3, 73-106, *in Desertification: Past, Current and Future Trends*, New York, V.R. Squires & A. Ariapour (ed.), Nova science publishers, 297 p.

HLPE, 2016. *Le développement agricole durable au service de la sécurité alimentaire et de la nutrition : quels rôles pour l'élevage ?*, Rapport du Groupe d'experts de haut niveau sur la sécurité alimentaire et la nutrition du Comité de la sécurité alimentaire mondiale, Rome.

Hodgson J., Illius A.W. (ed), 1996. *The ecology and management of grazing systems*, Wallingford, CAB International, 466 p.

Hostiou N., 2003. *Pratiques et stratégies de gestion des ressources herbagères cultivées par des éleveurs laitiers sur un front pionnier en Amazonie brésilienne : le cas du municipe de Uruará*, Thèse de doctorat INA Paris-Grignon, Paris, 206 p.

Ickowicz A., Mbaye M., 2001. Forêts soudaniennes et alimentation des bovins au Sénégal : potentiel et limites, *Bois et forêts des tropiques*, 270:47-61.

Ickowicz A., 1995. *Approche dynamique du bilan fourrager appliquée à des formations pastorales du Sahel tchadien*, Thèse d'Université, Paris XII-Créteil, 470 p.

Ingrand S., Lurette A., Gouttenoire L., Devun J., Moulin C.H., 2014. Le processus d'innovation en ferme. Illustrations en élevage, *INRA Productions animales*, 27(2):147-160.

IYRP, 2021. Calling for support to designate an International Year of Rangelands & Pastoralists, 1 p.



Jemaa T., Huguenin J., Moulin C.H., Najer T., 2016. Les systèmes d'élevage de petits ruminants en Tunisie Centrale – stratégies différenciées et adaptations aux transformations du territoire, *Cahiers agricultures*, 25:45005. https://doi.org/10.1051/cagri/2016030

Juanes X., Alary V., Osman M.A., Aboul-Naga A., 2020. Dataset for describing the diversity of household farming systems and the degree of crop-livestock diversification and integration in the Western part of Nile Valley (Egypt), *Agricultural Systems*, 183:102863. https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105879

Laisse S., Baumont R., Dusart L., Gaudré D., Rouillé B., Benoit M., Veysset P., Rémond D., Peyraud J.L., 2019. L'efficience nette de conversion des aliments par les animaux d'élevage : une nouvelle approche pour évaluer la contribution de l'élevage à l'alimentation humaine, *INRA Productions animales*, 31(3):269-288. https://doi.org/10.20870/productions-animales.2018.31.3.2355

Lasseur J., Dupré L., 2017. Entre production d'agneaux, incitations environnementales et inscription dans le local : débats au sein du monde professionnel et reconfiguration des activités dans les Alpes du sud, *Pour*, 231:157-166.

Lauvie A., Rolland C., Moulin C.H., Casabianca F., 2013. How corsican cattle breeders consider the adaptation of their breed, an exploratory approach *in Book of abstracts of the 64th Annual Meeting of the European Association for animal Production*, 216.

Le Bourgeois T., Berton A., Blanfort V., Gaungoo A., Grard P., Marnotte P., Rajagopal P., Randriamampianina J., Vattakaven T., Yahaya I., 2019. Enjeux et contraintes du partage et de la diffusion des connaissances en malherbologie tropicale, exemple du portail collaboratif Wiktrop, *in 24e Conférence du COLUMA : Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes*, 3-5 décembre 2019, Alfortville, Végéphyl, 9 p., Orléans, France.

Le Bourgeois T., Bonnet P., Edelin C., Grard P., Prospéri J., Théveny F., Barthélémy D., 2008. L'identification des adventices assistée par ordinateur avec le système Idao, *Innovations agronomiques*, 3:167-175.

Le Gal P.Y., Andrieu N., Bruelle G., Dugué P., Monteil C., Moulin C.H., Penot E., Ryschawy J., 2021. Modelling mixed crop-livestock farms for supporting farmers' strategic reflections: the CLIFS approach, *Computers and Electronics in Agriculture*, 192:106570. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106570

Le Houérou H.N., 1995. *Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique – Diversité biologique, développement durable et désertisation*, Montpellier, Ciheam, 396 p. (Option Méditerranéennes : Série B n°10).

Louhaichi M., Ouled Belgacem A., Petersen S.L., Hassan S., 2019. Effects of climate change and grazing pressure on shrub communities of West Asian rangelands, *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 11(5):660-671. https://doi.org/10.1108/IJCCSM-02-2018-0017

Lurette A., Fréret S., Chanvallon A., Experton C., Frappa B., Gatien J., Dartois S., Martineau C., Le Danvic C., Ribaud D., Fatet A., Pellicer-Rubio M., 2016. La gestion de la reproduction en élevages ovins et caprins, conventionnels et biologiques : états des lieux, intérêt et acceptabilité de nouveaux outils dans six bassins de production en France, *INRA Productions animales*, 29(3):163-184.

Macé T., González-García E., Foulquié D., Carrière F., Pradel J., Durand C., Douls S., Allain C., Hazard D., 2022. Genome-wide analyses reveal a strong association between LEPR gene variants and body fat reserves in ewes, *BMC genomics*, 23(1):1-15.

Macé T., González-García E., Carrière F., Douls S., Foulquié D., Robert-Granié C., Hazard D., 2019. Intra-flock variability in the body reserve dynamics of meat sheep by analyzing BW and body condition score variations over multiple production cycles. *Animal*, 13(9):1986-1998. https://doi.org/10.1017/S175173111800352X

Macé T., González-García E., Carrière F., Douls S., Foulquié D., Robert-Granié C., Hazard D., 2018a. Genetic analysis of robustness in meat sheep through body weight and body condition score changes over time, *Journal of Animal Science*, 96:4501-4511. https://doi.org/10.1093/jas/sky318



Macé T., Hazard D., Carrière F., Douls S., Foulquié D., Robert-Granié C., González-García E., 2018b. Body weight and body condition score variations in Romane ewes: intraflock variability in their dynamics and magnitude over multiple production cycles, *in ADSA-ASAS Joint Annual Meeting of the American Society of Animal Science*, 24-27 juin 2018, Knoxville (Tennessee), États-Unis, *Journal Dairy Science*, 101(2):236.

Mahyou H., Tychon B., Lang M., Balaghi R., 2018. Phytomass estimation using eMODIS NDVI and ground data in arid rangelands of Morocco, *African Journal of Range & Forage Science*, 35(1):1-12. https://doi.org/10.2989/10220119.2018.1436088

Mamine F., Fares M., 2021. Product-service systems in direct crop-livestock relationships, *International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology*, À paraître.

Mamine F., Fares M., Minviel J., 2020. Contract Design for Adoption of Agrienvironmental Practices: A Meta-analysis of Discrete Choice Experiments, *Ecological Economics*, 176(1):106721.

Marblé Y., 2019. Analyse de la contribution des systèmes laitiers au développement durable des territoires. Étude de deux micro territoires contrastés en Inde du Sud-est et à l'Île de La Réunion, Thèse de doctorat pour l'obtention du grade de Docteure en Sciences économiques, Université de la Réunion, Saint-Denis, France, 276 p.

Meuret M., Moulin C.H., Bonnet O., Garde L., Nozières-Petit M.O., Lescureux N., 2020. Missing shots: has the possibility of shooting wolves been lacking for 20 years in France's livestock protection measures?, *The Rangeland Journal*, 42:401-413.

Meuret M., Garde L., Moulin C.H., Nozières-Petit M.O., Vincent M., 2017. Élevage et loups en France : historique, bilan et pistes de solution, *Inra Production animales*, 30(5):465-478.

Meuret M., Osty P.L., 2015. Les loups des Rocheuses du nord : chronique d'une icône sous contrôles, *Pastum*, 104:31-39.

Meuret M., 2010. *Un savoir-faire de bergers*, Versailles, Éditions Quæ, 334 p.

Meynard J.M., Charrier F., Fares M., Le Bail M., Magrini M.B., Charlier A., Messéan A., 2018. Socio-technical lock-in hinders crop diversification in France, *Agronomy for Sustainable Development*, 38(54). https://doi.org/10.1007/s13593-018-0535-1

Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*, Washington, Island Press, 155 p.

Mottet A., Teillard F., Boettcher P., De' Besi G., Besbes B., 2018. Review: Domestic herbivores and food security: current contribution, trends and challenges for a sustainable development, *Animal*, 12(s2):188-198. http://doi.org/10.1017/S1751731118002215

Mottet A., de Haan C., Falcucci A., Tempio G., Opio C., Gerber P., 2017. Livestock: on our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate, *Global Food Security*, 14:1-18.

Müller J.P., Opplert M., Pachoud C., Morales H., Martins R., Hubert B., Ickowicz A., Lasseur J., Blanfort V., Tourrand J.F., Wedderburn L., 2021. An ontology of livestock grazing systems, *Rangeland Journal*, À paraître.

Napoléone M., 2016. *When proximity trivialise the terroir*, communication orale et poster au forum *Origine développement territoire*, 20-22 sept. 2016, Turin.

Ndiaye O., Diop A.T., Diène M., Akpo L.E., 2015. Étude comparée de la végétation de 1964 et 2011 en milieu pâturé : Cas du CRZ de Dahra, *Journal of Applied Biosciences*, 88:8235-8248.

Nozières-Petit M.O., 2019. Quels marchés pour les produits des systèmes agropastoraux ? *in* Aubron C., Garambois N., Nozières-Petit M.O., *L'économie agropastorale revisitée*, Association Française de Pastoralisme, Cardère éditeur, p. 77-86.

Osis R., 2019. Relations spatiales entre les ressources biophysiques et les dynamiques d'occupation du sol du front pionnier en Amazonie orientale, Thèse de doctorat en géographie, Le Mans Université, Le Mans, 2019, 354 p.

OSS, 2008. *Vers un système d'alerte précoce à la sécheresse au Maghreb*, Tunis, OSS, 84 p. (Coll. Synthèse n° 4).

Ouvrard M., Magnier J., Raoul S., Anlidine M., Attoumani H., Oussoufi A., Kamardine M., Janelle J., Naves M., Flori L., Gautier M., Tillard E., 2019. Caractérisation phénotypique et génétique : le cas du zébu mahorais, *in Actes de séminaire de clôture de la phase 1 des projets du RITA Mayotte (2015-2017)*, 14-16 mai 2018, Brandrélé, Mayotte, p. 9-16, Huat Joël, Rita Mayotte, Cirad.

Payet E., 2010. *Évaluation de l'efficacité technique, économique et environnementale des productions laitières de La Réunion*, Mémoire de Master 2 AQO et APE, Université de la Réunion.

Perucho L., Lauvie A., Nozières-Petit M.O., Moulin C.H. *Adaptation of local breeds is not only a biological question: Illustration with four French Mediterranean sheep breeds*, Options Méditerranéennes, À paraître.

Perucho L., 2018. *Rôle des pratiques de gestion génétique dans l'adéquation entre troupeaux de races locales et conduites pastorales*, Thèse de Doctorat, Montpellier SupAgro.

Pica-Ciamarra L., Tasciotti J., Otté A., Zezza A., 2015. Livestock in the Household Economy: Cross-Country Evidence from Microeconomic Data, *Development Policy Review*, 33(1):61-81.

Pinillos D., 2021a. *Perspectives for multifunctional landscapes in the Amazon: analyzing farmers' strategies, perceptions and scenarios in an agricultural frontier*, Thèse doctorale, Montpellier Supagro et Université de Wagueningen, 236 p.

Pinillos D., Poccard-Chapuis R., Bianchi F.J.J.A., Corbeels M., Timler C.J., Tittonell P., Ballester M.V., Schulte R., 2021b. Landholders' perceptions on legal reserves and agricultural intensification: Diversity and implications for forest conservation in the eastern Brazilian Amazon, *Forest Policy and Economics*, 129:102504. http://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102504

Plassin S., 2018. *Élever des bovins dans des paysages éco-efficients. Comprendre et modéliser le processus d'intensification dans les fermes d'élevage d'Amazonie Orientale brésilienne*, Thèse d'Université, Agroparistech, 456 p.

Plassin S.S., Poccard-Chapuis R., Laurent F., Piketty M.G., Martinez G.P., Tourrand J.-F., 2017. Paysage et intensification de l'élevage en Amazonie brésilienne : De nouvelles dynamiques spatio-temporelles à l'échelle des exploitations agricoles. *Confins. Revue franco-brésilienne de géographie*, 33. https://doi.org/10.4000/confins.12551

Poccard-Chapuis R., Plassin S., Osis R., Pinillos D., Pimentel G.M., Thalês M.C., Laurent F., Gomes M.R. de O., Ferreira Darnet L.A., Peçanha J. de C., Piketty M.-G., 2021. Mapping Land Suitability to Guide Landscape Restoration in the Amazon, *Land*, 10(4):368. https://doi.org/10.3390/land10040368

Poccard-Chapuis R., 2004. *Les réseaux de la conquête*, Thèse de doctorat en géographie, Université Paris 10 – Nanterre, 410 p.

Quisumbing A.R., Meinzen-Dick R., Raney T.L., Croppenstedt A., Behrman J.A., Peterman A., 2014. Closing the Knowledge Gap on Gender in Agriculture, *in* Quisumbing A., Meinzen-Dick R., Raney T., Croppenstedt A., Behrman J., Peterman A. (eds), *Gender in Agriculture*, Dordrecht, Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8616-4_1

Rigolot C., Martin G., Dedieu B., 2019. Renforcer les capacités d'adaptation des systèmes d'élevage de ruminants : Cadres théoriques, leviers d'action et démarche d'accompagnement, *INRA Productions animales*, 32:1-12.

Robinson T.P., Thornton P.K., Franceschini G., Kruska R.L., Chiozza F., Notenbaert A., Cecchi G., Herrero M., Epprecht M., Fritz S., You L., Conchedda G., See L., 2011. *Global livestock production systems*, Rome, FAO et ILRI, 152 p.



Rosenstock T.S., Mathew M., Pelster D.E., Butterbach-Bahl K., Rufino M.C., Thiong'o M., Mutuo P., Abwanda S., Rioux J., Kimaro A.A., Neufeldt H.C.J.G., 2016. Greenhouse gas fluxes from agricultural soils of Kenya and Tanzania, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. https://doi.org/10.1002/2016JG003341

Salgado P., Tillard E., Nabeneza S., Bigot C.-E., Barbet-Massin V., Dutreuil F., Bonnefois M., Dardenne P., Lecomte P., 2013. Setting up NIRS portable devices to assess forage quality at the farm level, *in* Bellon Maurel V., Williams P., Downey G., Kaboré R. (eds), *Proc. 16th Int. Conf. on NIRS*, 2-7 juin 2013, La Grande-Motte, France, p. 671-673.

Sarr O., Ngom D., Bakhoum A., Akpo L., 2013. Dynamique du peuplement ligneux dans un parcours agrosylvopastoral du Sénégal, *VertigO, la revue électronique en sciences de l'environnement*, 13.

Schumpeter J., 1939. *Business Cycles*, Mc. Graw-Hill.

Schumpeter J., 1911. *Théorie de l'évolution économique*, Dalloz, 1983.

Sebillotte M., 2004. *Contribution de l'INRA à la réflexion sur l'avenir de la recherche*, Synthèse des débats internes, 2 juillet 2004, Inra.

Sempéré G., Moazami-Goudarzi K., Eggen A., Laloë D., Gautier M., Flori L., 2015. WIDDE: a Web-Interfaced next generation database for genetic diversity exploration, with a first application in cattle, *BMC Genomics*, 16:940.

Sere C., Steinfeld H., 1996. *World livestock production systems. Current status, issues and trends*, Rome, FAO.

Sib O., González-García E., Bougouma-Yameogo V.M.C., Blanchard M., Vall É., 2020. Coconception, installation et évaluation de banques fourragères arbustives pour l'alimentation des vaches laitières dans l'ouest du Burkina Faso, *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 73(1):27-35. https://doi.org/10.19182/remvt.31841

Simonet G., 2009. Le concept d'adaptation : polysémie interdisciplinaire et implication pour les changements climatiques, *Natures sciences sociétés,* 17:392-401.

Slimani H., Aïdoud A., 2018. Quarante ans de suivis dans la steppe du Sud-Oranais (Algérie) : Changements de diversité et de composition floristiques. *Revues d'Écologie (Terre et Vie)*, 73(3):293-308.

Snaibi W., Mezrhab A., 2021. Livestock Breeders' Adaptation to Climate Variability and Change in Morocco's Arid Rangelands. Chapitre 91, *in* Leal Filho W., Oguge N., Ayal D., Adeleke L., da Silva I. (eds.), *African Handbook of Climate Change Adaptation*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45106-6_18

Soussana J.F., Tallec T., Blanfort V., 2010. Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands, *Animal*, 4(3):334-350. https://doi.org/10.1017/S1751731109990784

Sow A.P., 2020. *Co-concevoir un système de collecte de lait efficient dans la région de Fatick. Les défis de l'émergence d'une chaîne de valeur lait*, Mémoire de Master 2 géographie, aménagement, environnement et développement (Gaed), Spécialité mondialisation, développement et dynamiques spatiales dans les pays du Sud, Sorbonne Université.

Spielman D.J., 2006. A critique on innovation systems perspective on agricultural research in developing countries, *Innovation Strategy Today*, 2(1):41-54.

Stahl C., Fontaine S., Klumpp K., Picon-Cochard C., Grise M.M., Dezecache C., Ponchant L., Freycon V., Blanc L., Bonal D., Burban B., Soussana J.F., Blanfort V., 2017. Continuous soil carbon storage of old permanent pastures in Amazonia, *Global Change Biology*, 23(8):3382-3392. https://doi.org/10.1111/gcb.13573

Stahl C., Fontaine V., Dézécache C., Ponchant L., Freycon V, Picon-Cochard C., Klumpp K., Blanfort V., 2016. Soil carbon stocks after conversion of Amazonian tropical forest to grazed pasture: importance of deep soil layers, *Regional Environmental Change*, 16(7):1-11. https://doi.org/10.1007/s10113-016-0936-0

Stark F., Gonzalez-Garcia E., Navegantes L., Miranda T., Poccard-Chapuis R., Archimede H., Moulin C.H., 2018. Crop-livestock integration determines the agroecological performance of mixed farming systems in Latino-Caribbean farms. *Agronomy for Sustainable Developement,* 38,4. https://doi.org/10.1007/s13593-017-0479-x

Steinfeld H., Gerber P., Wassenaar T., Castel V., Rosales M., de Haan C., 2006. *Livestock's Long Shadow. Environmental Issues and Options*, Rome, FAO, 390 p.

Svensk M., Bastianelli D., Bonnal L., Taugourdeau S., 2018. Utilisation de la Spir pour l'étude des traits fonctionnels de plantes conservées en herbier, in *19[es] rencontres HelioSpir*, 8-9 nov. 2018, Montpellier.

Talib R., Kashif Hanif M., Ayesha S., Fatima F., 2016. Text Mining: Techniques, Amplications and Issues, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 7(11):414-418.

Taugourdeau S., Daget P., Chatelain C., Mathieu D., Juanès X., Huguenin J., Ickowicz A., 2019. FLOTROP, a massive contribution to plant diversity data for open ecosystems in northern tropical Africa, *Scientific Data*, 6(118).

Thévenot A., 2014. Un nouveau cadre conceptuel pour évaluer la contribution des filières agricoles au développement durable des territoires – application à la filière avicole réunionnaise, Thèse de doctorat, Université de La Réunion, Saint Denis, 210 p.

Thévenot A., Aubin J., Tillard E., Vayssières J., 2013. Accounting for farm diversity in Life Cycle Assessment studies – the case of poultry production in a tropical island, *Journal of Cleaner Production*, 57:280-292.

Thévenot A., Vigne M., Vayssières J., 2011. Référentiel pour l'analyse énergétique et l'analyse du pouvoir de réchauffement global des exploitations d'élevage à La Réunion, Rapport technique Cirad, FRCA, Ademe, 32 p.

Thorpe A., 2009. Enteric fermentation and ruminant eructation: the role (and control?) of methane in the climate change debate, *Climatic Change*, 93:407-431.

Valdivia C., 2001. Gender, Livestock Assets, Resource Management, and Food Security: Lessons from the SR-CRSP, *Agriculture and Human Values*, 18(1):27-39.

Vall É., Alary V., Blanchard B., Corniaux C., Duteurtre G., Lecomte P., Poccard-Chapuis R., Salgado P., Vayssières J., 2016a. Evolution of livestock multiple functions in tropical landscapes: a comparison of trends in different observatories of livestock systems in Africa, Asia and Latin America, *in* 10[th] International Rangeland Congress, 17-22 juil. 2016, Saskatoon, Canada, poster, 1 p.

Vall É., Chia E., Blanchard M., Koutou M., Coulibaly K., Andrieu N., 2016b. La co-conception en partenariat de systèmes agricoles innovants, *Cahiers sgricultures*, 25(1):15001.

Vall É., Koutou M., Blanchard M., Bayala I., Mathé S., 2016c. *L'impact c'est la trace !* Impress, Cirad, Montpellier, 84 p.

Vall É., Diallo M.A., Fako-Ouattara B., 2015. De nouvelles règles foncières pour un usage plus agroécologique des territoires en Afrique de l'Ouest, *Sciences eaux & territoires*, 16:52-56.

Vayssières J., Thévenot A., Acosta I., Vigne M., Tillard E., 2019. A participatory, territory-rooted and change-oriented approach to assess the multi-criteria contribution of an agrifood value chain to sustainable development, *Indonesian Journal of Life Cycle Assessment and Sustainability*, 3(1):43-63.

Vayssières J., Thévenot A., Vigne M., Cano M., Broc A., Bellino R., Diacono E., De Laburthe B., Bochu J.L., Tillard E., Lecomte P., 2011a. Évaluation des inefficiences zootechnique et environnementale pour intensifier écologiquement les systèmes d'élevage tropicaux, *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 64(1-4):73-79.

Vayssières J., Vigne M., Alary V., Lecomte P., 2011b. Integrated participatory modelling of actual farms to support policy making on sustainable intensification, *Agricultural Systems*, 104:146-161.



Vayssières J., Thévenot A., Vigne M., Tillard E., Lecomte P., 2010. Comparing energy use efficiency and greenhouse gas emissions for livestock products, *in SAPT International Conference*, 15-18 nov. 2010, Guadeloupe, France, poster, 506-507.

Vigne M., Achard P., Alison C., Castanier C., Choisis J.-P., Conrozier R., Courdier R., Degenne P., Deulvot A., Dupuy S., Février A., Hatik C., Huat J., Kleinpeter V., Kyulavski V., Lurette A., Payet A.L., Rondeau P., Soulie J.C., Thomas P., Thuriès L., Tillard E., Van de Kerchove V., Vayssières J., 2021a. Une agronomie clinique et territoriale pour accompagner la transition vers une économie, *Agronomie, Environnement et Sociétés*, 11(2), 16 p. https://doi.org/10.54800/bir974

Vigne M., Dorin B., Aubron C., 2021b. Is feeding the Indian dairy cow sustainable? A tentative multiscalar answer, *International Journal of Agricultural Sustainability*, 20(2):140-152. https://doi.org/10.1080/14735903.2021.1920237

Vigne M., Blanfort V., Vayssières J., Lecomte P., Steinmetz P., 2015. Contraintes sur l'élevage dans les pays du Sud : les ruminants entre adaptation et atténuation, *in* Torquebiau E. (ed.), *Changement climatique et agricultures du monde*, Versailles, Éditions Quæ, p. 23-35 (Agricultures et défis du monde).

Vigne M., Vayssières J., Lecomte P., Peyraud J.L., 2012. Evaluating the ability of current energy use assessment methods to study contrasting livestock production systems, *Journal of Environmental Management*, 112:199-212.

Vigne M., Bochu J.L., Vayssières J., Lecomte P., 2009a. Considérer deux dimensions énergétiques pour mieux évaluer les systèmes d'élevage : cas de l'élevage laitier à la Réunion, *in Seizièmes rencontres autour des recherches sur les ruminants*, 2-3 déc. 2009, Paris, INRA, Paris. http://www.journees3r.fr/spip.php?article2884

Vigne M., Vayssières J., Bochu J.L., Lecomte P., 2009b. Energy use efficiency and greenhouse gases emissions of dairy farmes of an isolated territory: Reunion Island from 2000 to 2007, *in* Proceedings of the *Conference on Integrated Assessment of Agriculture and Sustainable Development: Setting the Agenda for Science and Policy (AgSAP 2009)*, 10-12 mars 2009, Egmond aan Zee, Pays-Bas, p. 430-431, Wolf J., Van Laar H., Wageningen University and Research Centre, Wageningen.

Vigne M., 2007. *Évaluation du bilan énergétique des exploitations bovines laitières de la Réunion*, Mémoire de Master 2 en biologie, géosciences, agroressources et environnement, spécialité productions animales en régions chaudes, Cirad, Université Montpellier II, 77 p.

Wane A., Cesaro J.D., Duteurtre G., Touré I., Ndiaye A., Alary V., Juanès X., Ickowicz A., Ferrari S., Velasco G., 2020a. The economics of pastoralism in Argentina, Chad and Mongolia. Market participation and multiple livelihood strategies in a shock-prone environment, *FAO Animal Production and Health Paper*, 182. https://doi.org/10.4060/cb1271en

Wane A., Mballo A.D., Cabrelle L.D.H., Diakhaté P., 2020b. Reducing food loss and waste as food security strategy and improvement of value chain performance in the Sahel, *in* IFAMA Conference 2021, 21-25 juin 2021, 30 p., *Under review*.

Wane A., Morton J., Boureima F., Ndlovu F., 2018. *Beef value chain analysis in eSwatini*, Final Report for the EU-DEVCO, VCA4D, 128 p.

Wedderburn L., Ickowicz A., Mauricio R., Quiroga M., Blanchard M., Le Thi Thanh H., Hubert B., Lasseur J., Blanfort V., Müller J.P., 2021. Restoring value to grassland initiative: to maintain the environmental and economic value of grasslands and to promote their social and cultural functions, paper and oral presentation, *in 11th International Rangeland Congress*, 25-29 oct. 2021, Kenya.

Wezel A., Gemmill Herren B., Bezner Kerr R., Barrios E., Rodrigues Gonçalves A.L., Sinclair F., 2020. Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems. *A review. Agronomy for Sustainable Development*, 40:40. https://doi.org/10.1007/s13593-020-00646-z

Zieger A., Kaiser K., Ríos Guayasamín P., Kaupenjohann M., 2018. Massive carbon addition to an organic-rich Andosol increased the subsoil but not the topsoil carbon stock, *Biogeosciences*, 15:2743-2760. https://doi.org/10.5194/bg-15-2743-2018

Zoungrana S.R., 2020. *Conception de scénarios d'amélioration de la production laitière pour approvisionner une laiterie à Madagascar*, Mémoire de master en agronomie et agroalimentaire, parcours systèmes d'élevage, Institut agro.



Liste des sigles et acronymes

ACCT : *agriclimatechange tool*.

AOP : appellation d'origine protégée. Signe européen de reconnaissance de qualité et d'origine des produits agricoles.

Asap : dispositif de recherche et de formation en partenariat sur les « systèmes agro-sylvo-pastoraux en Afrique de l'Ouest» du Cirad au Burkina-Faso. https://www.dp-asap.org/

CFL : charte foncière locale.

Cilss : Comité permanent interétats de lutte contre la sécheresse dans le Sahel. Institution intergouvernementale des pays du Sahel. http://portails.cilss.bf/

Cirad : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement. Établissement public à caractère industriel et commercial (Épic) français. https://www.cirad.fr/

DOM : départements d'outre-mer.

dP : dispositif de recherche et de formation en partenariat du Cirad. Les dP sont positionnés dans certains pays du sud partenaires de recherche du Cirad. https://www.cirad.fr/dans-le-monde/dispositifs-en-partenariat

DROM : départements et régions d'outre-mer.

FAO : Organisation des Nations unies pour l'Alimentation et l'Agriculture.

Flotrop : base de données Cirad de relevés floristiques en Afrique déposée et en accès libre sur GBIF. https://www.gbif.org/fr/dataset/eb605c7a-a91c-4ab8-a588-85d0ccb2be9e

GBIF : *global biodiversity information facility*. Base de données internationale libre et ouverte sur la biodiversité. https://www.gbif.org/fr/

GES : gaz à effet de serre.

Giec : Groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat.

IAE : intégration agriculture-élevage.

Idao : identification des plantes assistée par ordinateur.

INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement. Établissement public à caractère scientifique et technique (EPST) français. https://www.inrae.fr/

Institut agro Montpellier : école interne de l'Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement qui regroupe les écoles de Dijon, Montpellier et Rennes-Angers. https://www.institut-agro-montpellier.fr/

MO : matière organique.

MS : matière sèche.

NEC : note d'état corporel.

NEFA : acides gras non estérifiés.

OCDE : Organisation de coopération et de développement économique.

ODD : objectif(s) pour le développement durable du programme de développement durable à l'horizon 2030 des Nations unies. Il en existe 17.

ONU : Organisation des Nations unies.

PIB : produit intérieur brut.

PME : petites et moyennes entreprises.

PPZS : pôle pastoralisme et zones sèches. dP du Cirad au Sénégal. https://www.ppzs.org/



PV : poids vif.

RC : réserves corporelles.

RGV : recouvrement global moyen de la végétation.

SAU : superficie agricole utilisée.

Selmet: unité mixte de recherche « Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux » sous tutelle du Cirad, d'INRAE et de l'Institut agro Montpellier. https://umr-selmet.cirad.fr/

SEP : systèmes d'élevage au pâturage

SPAD : dP sur les « systèmes de production d'altitude et durabilité » du Cirad à Madagascar. https://www.dp-spad.org/

Spir : spectrométrie dans le proche infrarouge.

TAE : transition agroécologique.

UMR : unité mixte de recherche portée par plusieurs institutions de recherche et d'enseignement supérieur françaises.

UGB : unité gros bovins.

UBT: unité bétail tropical.

UE : Union européenne.

UV : ultraviolets.



Liste des auteurs

Alary Véronique
Cirad – UMR Selmet
Icarda, Tunis, Tunisie
véronique.alary@cirad.fr

Alhamada Moutaz
ISTOM
Angers, France
m.alhamada@istom.fr

Alvarez Stéphanie
Cirad – UMR Selmet
Cirad, Saint Pierre, La Réunion, France
stalvaaa@gmail.com

Amsidder Lina
Cirad – UMR Selmet
Montpellier, France
lina.amsidder@cirad.fr

Assouma, Habibou
Cirad – UMR Selmet
Cirdes, Asap, Bobo-Dioulasso,
Burkina Faso
habibou.assouma@cirad.fr

Aubron Claire
Institut agro Montpelliers – UMR Selmet
Montpellier, France
claire.aubron@supagro.fr

Bastianelli Denis
Cirad – UMR Selmet
Montpellier, France
denis.bastianelli@cirad.fr

Bazan Samantha
Cirad – UMR Selmet
Montpellier, France
samantha.bazan@cirad.fr

Benagabou Ouèbounga Ida
Université Thomas Sankara – Centre
Universitaire de Dori
Ouagadougou, Burkina Faso
idadec@yahoo.fr

Berre David
Cirad – UMR Aïda
Montpellier, France
david.berre@cirad.fr

Blancard Stéphane
Institut agro Dijon – Cesaer
Dijon, France
stephane.blancard@agrosupdijon.fr

Blanchard Mélanie
Cirad – UMR Selmet
Nias, Asea, Hanoï, Vietnam
melanie.blanchard@cirad.fr

Blanfort Vincent
Cirad – UMR Selmet
Montpellier, France
vincent.blanfort@cirad.fr

Bois Bérénice
IRD – UMR Selmet
Montpellier, France
bois.berenicea@gmail.com

Bonicel Luc
INRAE – UMR Selmet
Montpellier, France
luc.bonicel@inrae.fr

Boussemart Jean-Philippe
Ieseg
Lille, France
jp.boussemart@ieseg.fr

Cesaro Jean-Daniel
Cirad – UMR Selmet
ISRA-CRA, PPZS, Saint Louis, Sénégal
jean-daniel.cesaro@cirad.fr

Corniaux Christian
Cirad – UMR Selmet
Montpellier, France
christian.corniaux@cirad.fr

Croissant Yves
Université de La Réunion – CEMOI
St Denis, La Réunion, France
yves.croissant@univ-reunion.fr



Debus Nathalie
INRAE – UMR Selmet
Montpellier, France
nathalie.debus@inrae.fr

Duteurtre Guillaume
Cirad – UMR Selmet
Montpellier, France
guillaume.duteurtre@cirad.fr

Édouard-Rambaut Louis Axel
Cirad – UMR Selmet
St Pierre, La Réunion, France
louis-axel.edouard-rambaut@cirad.fr

Fares M'Hand
INRAE – UMR Selmet
Montpellier, France
mehand.fares@inrae.fr

Flori Laurence
INRAE – UMR Selmet
Montpellier, France
laurence.flori@inrae.fr

González-García Eliel
INRAE – UMR Selmet
Montpellier, France
eliel.gonzalez-garcia@inrae.fr

Grillot Myriam
INRAE – UMR Agir
Castanet-Tolosan, France
myriam.grillot@inrae.fr

Hubert Bernard
INRAE
Paris, France
bernard.hubert@inrae.fr

Huguenin Johann
Cirad – UMR Selmet
Montpellier, France
johann.huguenin@cirad.fr

Ickowicz Alexandre
Cirad – UMR Selmet
Montpellier, France
alexandre.ickowicz@cirad.fr

Juanes Xavier
Cirad – UMR Selmet
Montpellier, France
xavier.juanes@cirad.fr

Lasseur Jacques
INRAE – UMR Selmet
Montpellier, France
jacques.lasseur@inrae.fr

Lauvie Anne
INRAE – UMR Selmet
Montpellier, France
anne.lauvie@inrae.fr

Le Bourgeois Thomas
Cirad – UMR Amap
Montpellier, France
thomas.le_bourgeois@cirad.fr

Lecomte Philippe
CRA-W de Gembloux
Gembloux, Belgique
phlecomte@gmail.com

Leleu Hervé
Ieseg
Lille, France
h.leleu@ieseg.fr

Magnier Jessica
Cirad – UMR Selmet
Montpellier, France
jessica.magnier@cirad.fr

Ménassol Jean-Baptiste
Institut agro Montpellier – UMR Selmet
Montpellier, France
jean-baptiste.menassol@supagro.fr

Messad Samir
Cirad – UMR Selmet
Montpellier, France
samir.messad@cirad.fr

Meuret Michel
INRAE – UMR Selmet
Montpellier, France
michel.meuret@inrae.fr

Moulin Charles-Henri
Institut agro Montpellier – UMR Selmet
Montpellier, France
charles-henri.moulin@supagro.fr

Müller Jean-Pierre
Cirad – UMR Sens
Montpellier, France
jean-pierre.muller@cirad.fr



Napoléone Martine
INRAE – UMR Selmet
Montpellier, France
martine.napoléone@inrae.fr

Nozières-Petit Marie-Odile
INRAE – UMR Selmet
Montpellier, France
marie-odile.nozieres-petit@inrae.fr

Payet Emmanuelle
Chambre d'agriculture de La Réunion
St Pierre, La Réunion, France
emmanuelle.payet@reunion.chambagri.fr

Perucho Lola
INRAE – UMR Selmet
Montpellier, France
lola.perucho@inrae.fr

Plassin Sophie
INRAE – UMR Agir
Castanet-Tolosan, France
sophie.plassin@inrae.fr

Poccard-Chapuis René
Cirad – UMR Selmet
Embrapa, Paragominas, Brésil
rene.poccard-chapuis@cirad.fr

Salgado Paulo
Cirad – UMR Selmet
ISRA-LNERV, PPZS, Dakar, Sénégal
paulo.salgado@cirad.fr

Sib Ollo
Cirad – UMR Selmet
Cirdes, Asap, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso
ollo.sib@cirad.fr

Stark Fabien
INRAE – UMR Selmet
Montpellier, France
fabien.stark@inrae.fr

Taugourdeau Simon
Cirad – UMR Selmet
ISRA-LNERV, PPZS, Dakar, Sénégal
simon.taugourdeau@cirad.fr

Thévenot Alexandre
Mytilimer
Cancale, France
alexandre.thevenot@outlook.fr

Tillard Emmanuel
Cirad – UMR Selmet
Kourou, Guyane, France
emmanuel.tillard@cirad.fr

Vall Éric
Cirad – UMR Selmet
Montpellier, France
eric.vall@cirad.fr

Vayssières Jonathan
Cirad – UMR Selmet
St Pierre, La Réunion, France
jonathan.vayssieres@cirad.fr

Vigne Mathieu
Cirad – UMR Selmet
Spad, Antsirabé, Madagascar
mathieu.vigne@cirad.fr

Wane Abdrahmane
Cirad – UMR Selmet
Ilri, PPZS, Abidjan, Côte d'Ivoire
abdrahmane.wane@cirad.fr

Crédits iconographiques :
Carte 1 : Luc Bonicel/INRAE-Selmet, 2022
Figure 1.1(A) : reproduit de *Global Food Security*, 14, Mottet A., de Haan C., Falcucci A., Tempio G., Opio C., Gerber P., Livestock: On our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate, 1-8, 2017; avec l'autorisation d'Elsevier.
Figure 1.1(B) : reproduit de *Animal*, 12(s2), Mottet A., Teillard F., Boettcher P., DeBesi G., Besbes B., Review: Domestic herbivores and food security: current contribution, trends and challenges for a sustainable development, 188-198, 2018, avec l'autorisation d'Elsevier.
Figure 2.5 : reproduit de *Applied Animal Behaviour Science*, 157, Chirat G., Jeroen C.J Groot, Messad S., Bocquier F., Ickowicz A., Instantaneous intake rate of free-grazing cattle as affected by herbage characteristics in heterogeneous tropical agro-pastoral landscapes, 48-60, 2014, avec l'autorisation d'Elsevier.
Figure 2.6 : reproduit de Livestock Science, 216, Assouma M.H., Lecomte P., Hiernaux P., Ickowicz A., Corniaux C., Decruyenaere V., Diarra A.R., Vayssières J., How to better account for livestock diversity and fodder seasonality in assessing the fodder intake of livestock grazing semi-arid sub-Saharan Africa rangelands, 16-23, 2018, avec l'autorisation d'Elsevier.
Figure 2.10 : photos légendées M.O. : Mélissa Ouvrard ; photos légendées J.M. : Jessica Magnier.
Figure 2.11 : reproduit de Flori L., Moazami-Goudarzi K., Alary V., Araba A., Boujenane I., Boushaba N., Casabianca F., Casu S., Ciampolini R., Coeur D'Acier A., Coquelle C., Delgado J.V., El-Beltagi A., Hadjipavlou G., Jousselin E., Landi V., Lauvie A., Lecomte P., Ligda C., Marinthe C., Martinez A., Mastrangelo S., Menni D., Moulin C.H., Osman M.A., Pineau O., Portolano B., Rodellar C., Saïdi-Mehtar N., Sechi T., Sempéré G., Thévenon S., Tsiokos D., Laloë D., Gautier M., 2019. A genomic map of climate adaptation in Mediterranean cattle breeds, Molecular Ecology, 28(5):1009-1029, avec l'autorisation de John Wiley and sons Ltd.
Figure 2.12 : reproduit de Macé T., González-García E., Foulquié D., Carrière F., Pradel J., Durand C., Douls S., Allain C. & Hazard D., 2022. Genome-wide analyses reveal a strong association between LEPR gene variants and body fat reserves in ewes. *BMC genomics*, *23*(1), 1-15.
Figure 3.5 : reproduit de Solagro, FGN Fodensee Stiftung, Comunita montana, Région de Murica (2013), Une agriculture respectueuse du climat : évaluations et améliorations pour l'énergie et les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle de l'exploitation agricole dans l'Union européenne.
Figure 3.9 : reproduit de Stark F., Gonzalez-Garcia E., Navegantes L., Miranda T., Poccard-Chapuis R., Archimede H., Moulin C.H., 2018. Crop-livestock integration determines the agroecological performance of mixed farming systems in Latino-Caribbean farms. Agronomy for Sustainable Developement, 38, 4. Sous licence CC-BY 4.0.
Figure 3.12 : reproduit de Alvarez S., Rufino M.C., Vayssières J., Salgado P., Tittonell P., Tillard E., Bocquier F., 2014. Whole-farm nitrogen cycling and intensification of crop-livestock systems in the highlands of Madagascar: An application of network analysis. *Agricultural Systems*, 126:25-37, avec l'autorisation d'Elsevier.
Figure 3.13 : reproduit de Plassin S.S., Poccard-Chapuis R., Laurent F., Piketty M.G., Martinez G.P., Tourrand J.-F., 2017. Paysage et intensification de l'élevage en Amazonie brésilienne : De nouvelles dynamiques spatio-temporelles à l'échelle des exploitations agricoles. *Confins*. Revue franco-brésilienne de géographie, 33, avec l'autorisation de la revue *Confins*.
Figure 3.14 : reproduit de *Agricultural Systems*, 193:103218, Aubron C., Vigne M., Philippon O., Lucas C., Lesens P., Upton S., Salgado P., Ruiz L., Nitrogen metabolism of an Indian village based on the comparative agriculture approach: How characterizing social diversity was essential for understanding crop-livestock integration, 2021, avec l'autorisation d'Elsevier.

Tous les sites Internet mentionnés dans cet ouvrage ont été consultés le 10/06/2022.

Coordination éditoriale : Valérie Mary
Édition : Alice Durand
Mise en page : EliLoCom

Les élevages familiaux de ruminants au pâturage, en territoires méditerranéens et tropicaux, contribuent directement à huit des dix-sept objectifs du développement durable (ODD) du programme des Nations unies pour 2030. Ces élevages ont été longtemps en marge des efforts d'investissement en agriculture. Ils disposent cependant d'atouts indéniables pour répondre à ces ODD en interaction avec d'autres formes d'élevage présentes dans les territoires. Mais ils font face aussi à un ensemble de contraintes qui remettent en question leur pérennité.

La synthèse interdisciplinaire présentée ici vise à répondre à trois questions essentielles : comment renforcer les capacités d'adaptation de ces élevages pour répondre aux changements climatiques, sociaux et économiques ? Comment améliorer leur efficience à différents niveaux d'organisation et aux plans social, économique et environnemental ? Enfin, comment ces élevages peuvent-ils contribuer aux processus d'innovation pour la transition agroécologique ?

Cet ouvrage s'appuie sur les recherches publiées récemment par l'UMR Selmet (Cirad-INRAE-Institut Agro) portant sur une diversité de sites dans le monde et dans un large partenariat international. Il s'adresse à la communauté enseignante et scientifique, aux étudiants, aux acteurs du secteur de l'élevage et des territoires, intervenant aux différentes échelles de décision.

Alexandre Ickowicz est vétérinaire zootechnicien, inspecteur général de santé publique vétérinaire du ministère de l'Agriculture et de l'alimentation, et chercheur au Cirad. Il a coordonné des recherches interdisciplinaires sur les systèmes pastoraux et a été directeur de l'UMR Selmet de 2015 à 2020.

Charles-Henri Moulin est ingénieur agronome, enseignant-chercheur à l'Institut Agro Montpellier. Ses travaux portent sur l'analyse et l'accompagnement des transformations des activités d'élevage. Il est directeur-adjoint de l'UMR Selmet depuis 2015.





Éditions Cirad, Ifremer, INRAE
www.quae.com

26 €

ISBN : 978-2-7592-3485-1



ISSN : 2115-1229
Réf. : 02826